Avant-propos

Nous sommes en 2009, quatre centième anniversaire des premières observations de Galilée, et ceci donne lieu à une célébration internationale dans le cadre de l'Année mondiale de l'astronomie, proclamée par les Nations-unies et coordonnée, au niveau mondial, par l'Union astronomique internationale (UAI) et l'Unesco. En tant que Présidente de l'UAI, je me complais à dire que cette année célèbre aussi l'âge d'or de l'astrophysique. En effet, les avancées spectaculaires de la technologie depuis une trentaine d'années, et l'utilisation exceptionnelle que les astrophysiciens ont su en faire, ont amené à un bouleversement complet de notre vision et de notre compréhension de l'Univers et de ses composantes, du comportement interne du Soleil à la formation des étoiles et des planètes, de l'évolution des galaxies que l'on appréhende maintenant pratiquement sur les 14 milliards d'années de vie de l'Univers à celle des grandes structures, ces vastes toiles d'araignée qui traversent l'espace. La physique fondamentale se trouve également en révolution, en particulier la physique des particules élémentaires, pour tenter d'identifier le moteur de l'expansion accélérée de l'Univers et les mystérieux porteurs de masse qui constituent la matière noire, composante très dominante de matière dans l'Univers.

Dans cette explosion de connaissances, le CEA tire parti de ses atouts exceptionnels pour être un acteur conséquent, recevant une reconnaissance internationale qui ne cesse de croître. Ainsi, trois chercheurs du CEA impliqués dans cette thématique ont déjà reçu des bourses ERC (pour *European Research Council*). Au départ, le CEA s'est investi dans le spatial lorsque la France et l'Europe décidèrent de se lancer dans les sciences spatiales. On pensa immédiatement à la détection des rayonnements cosmiques de haute énergie (photons X et gamma, particules), qui ne pénètrent pas dans l'atmosphère terrestre, et donc au CEA qui, en raison de sa mission principale, détenait une expertise reconnue dans la détection de ces rayonnements. Le CEA fut d'emblée l'un des principaux laboratoires européens à embarquer des détecteurs de rayonnements de haute énergie sur des ballons, des fusées puis des satellites.

Aux côtés des chercheurs et ingénieurs développant des instruments se greffèrent des astrophysiciens qui raffermirent le lien entre le savoir-faire expérimental et l'interprétation des résultats en termes d'avancées des connaissances sur l'Univers. Au fil des ans, cette collaboration fructueuse amena une forte augmentation de la capacité, pour le CEA, à proposer des instruments et les missions les mieux à même de résoudre les problèmes les plus brûlants, ce qui lui permit d'être sélectionné par des instances nationales et internationales pour de nombreux instruments dans l'espace et au sol. Notons, par exemple, le grand succès de la caméra aux rayons gamma Sigma embarquée sur un satellite russe, et qui découvrit les microquasars, trous noirs de masse stellaire qui sont le siège de phénomènes analogues à ceux étant à l'œuvre dans les quasars.

L. GODART/CEA

« Le CEA tire parti de ses atouts exceptionnels pour être un acteur conséquent, recevant une reconnaissance internationale qui ne cesse de croître. »

L'intérêt vers de nouvelles thématiques scientifiques, tels le contenu en gaz des galaxies et l'étude de la formation des étoiles, ainsi que l'opportunité de tirer profits de synergies avec les équipes de la Direction de la recherche technologique (DRT), amena les astrophysiciens du CEA à se lancer aussi dans l'astronomie infrarouge au début des années 80. L'Agence spatiale européenne (ESA) préparait le premier observatoire infrarouge spatial, ISO, et le CEA avait la possibilité de prendre la responsabilité principale d'un instrument phare, la caméra. Il fallait pour cela disposer de matrices de détecteurs infrarouge qui, à cette époque, ne pouvaient être importés des USA. Ces détecteurs demandaient un développement spécifique pour pouvoir fonctionner avec un faible fond et le Laboratoire infrarouge du Leti se lança dans l'aventure, avec succès. Les résultats d'ISOCAM sur la formation des étoiles et l'évolution des galaxies, démontrant que les sursauts de formation d'étoiles et les galaxies à très fort flux infrarouge étaient beaucoup plus fréquents dans le passé, ont révolutionné le sujet. Aujourd'hui, un très grand nombre d'astrophysiciens de par le monde étudient les diverses étapes d'évolution des galaxies ; les résultats d'ISOCAM ont été confirmés et considérablement étendus par le satellite américain Spitzer et l'on attend maintenant des avancées importantes avec le satellite Herschel, qui vient d'être lancé. Pour Herschel, la DRT a développé des matrices de détecteurs novateurs, également utilisés au sol sur le radiotélescope APEX, et la Direction des sciences de la matière (DSM) a participé très activement à la construction de deux des trois instruments.

L'astronomie au sol, aussi, a fait de grandes avancées et il est devenu nécessaire d'en développer les instruments avec des méthodes quasi industrielles. Le savoir-faire acquis par le CEA avec le spatial fit qu'il a pu également déployer un instrument d'envergure, VISIR, sur l'un des télescopes géants du VLT, qui amène des informations uniques sur les disques protostellaires où se forment les planètes. Les chercheurs de l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu) sont aussi fortement impliqués dans la cosmologie et mènent des études observationnelles depuis le sol avec la caméra MEGACAM qu'ils ont construite pour le télescope CFHT, et depuis l'espace avec XMM-Newton, en attendant la large moisson de données sur le fond du ciel cosmologique espérée du satellite Planck.

Aujourd'hui, le CEA a également acquis de fortes compétences en simulations numériques. Ceci permet des avancées importantes dans des sujets aussi étudiés depuis le sol et l'espace par les chercheurs du CEA. Ainsi, après le succès de l'expérience GOLF, qui a mesuré les oscillations du Soleil, une modélisation détaillée de l'intérieur de notre étoile se trouve en cours. L'accélération des rayons cosmiques est aussi simulée, en synergie avec les observations de satellites, à l'instrumentation desquels le CEA a aussi participé (XMM-Newton et INTEGRAL) et d'autres, où il est associé à la science, tels le récent satellite Fermi et, au sol, HESS, qui détecte les rayons gamma de haute énergie avec une bonne précision de positionnement. Les résultats les plus spectaculaires concernent les simulations de l'évolution des grandes structures de l'Univers. Elles mettent en valeur l'importance de la chute de courants de gaz froid dans les régions où la masse s'assemble, et permettent de mieux préparer les missions futures de mesures des propriétés de la matière noire et de l'énergie noire au sein desquelles le CEA joue un rôle moteur.

L'avenir proche s'annonce brillant, avec l'exploitation continue de XMM-Newton – qui, entre autres, amène au CEA des résultats extraordinaires sur les amas de galaxies – d'INTEGRAL, de Fermi, des instruments au sol, et les débuts d'Herschel et de Planck ; en parallèle, au Cern, le LHC pourrait percer le mystère de la nature de la matière noire. En même temps, le CEA joue un rôle majeur dans la conception d'une caméra/spectromètre infrarouge, destinée au JWST, l'ambitieux successeur de Hubble, pour un nouvel instrument en astronomie gamma, réalisé en coopération avec la Chine, et en principal promoteur pour l'Europe d'une nouvelle mission de cosmologie.

Pour l'avenir plus lointain, de nombreuses possibilités se profilent dans le spatial, et la chasse aux neutrinos de haute énergie depuis le fond des mers va commencer. La grande aventure cosmique du CEA va se poursuivre.

> Catherine Cesarsky
Haut-commissaire à l'énergie atomique.

Voir l'invisible : petite histoire d'une grande conquête

Pendant plus de 2 000 ans, les astronomes ont été dans l'ignorance des lumières baignant le cosmos, excepté, bien sûr, de la lumière visible. Et pour cause : la plupart des rayonnements ne parviennent pas à franchir la barrière que leur oppose l'atmosphère. Dépasser cet obstacle supposait des instruments adaptés : d'abord des ballons puis des fusées et enfin des satellites.

CEA

Découverte du rayonnement gamma des pulsars. Charge et ballon stratosphérique à Aire-sur-l'Adour (juillet 1969).

Le 27 janvier 1959, face à la corniche des Maures, sur l'île du Levant qui appartient à la commune d'Hyères (Var), un événement se prépare qui va compter dans l'histoire de l'astrophysique française. En fin d'après-midi, dans le secret de la base navale, un mince trait lumineux s'élève dans le ciel avant de se perdre rapidement dans les nuages. S'agit-il d'un lancement pour expérimenter une arme destinée à la force de dissuasion nationale ? Rien de tel ! Mais un missile reconverti qui emporte, à plus de 100 kilomètres d'altitude, la première expérience française d'astrophysique spatiale issue des laboratoires du CEA.

Le CEA pionnier dans l'espace

L'épopée spatiale du CEA commence presque en même temps que la fondation de l'organisme. En effet, le 18 octobre 1945, le gouvernement de la France approuve l'ordonnance, élaborée par le conseiller d'État Jean Toutée, pour fonder le CEA voulu par le général de Gaulle afin « *[…] de poursuivre les recherches scientifiques et techniques en vue de l'utilisation de l'énergie atomique dans divers domaines de la science, de l'industrie, de la défense nationale* ». Nul ne se doute encore que ce nouvel organisme de recherche deviendra un formidable creuset de compétences sur la découverte de l'Univers. Et pourtant…

Le 2 janvier 1946, le général de Gaulle nomme au poste de haut-commissaire du CEA Frédéric Joliot, prix Nobel de chimie, en 1935, avec son épouse Irène Curie, pour leur découverte de la radioactivité artificielle. Cette nouvelle propriété de la matière se caractérise par la désintégration du **noyau** de l'**atome**, lequel émet alors d'étranges **rayonnements**, jusqu'ici inconnus et baptisés : alpha, bêta et gamma, faute d'imagination. Si les deux premiers sont, en réalité, des particules (noyaux d'**hélium** et **électrons**), en revanche, le troisième d'entre eux va bientôt se révéler comme la plus puissante forme de lumière existante dans la nature. Dès lors, les ingénieurs du CEA mettront toute leur énergie à concevoir des instruments capables de capter et de mesurer ces rayonnements. Pendant plusieurs années, ces études se font en laboratoire, mais la date du 4 avril 1957 marque une véritable révolution pour ces scientifiques : la mise en orbite de *Sputnik* puis, quelques années plus tard, en 1961, le premier vol dans l'espace du Soviétique Iouri Gagarine qui ouvre l'exploration spatiale. D'où le lancement réalisé, le 27 janvier 1959, sur l'île du Levant, avec une fusée Daniel, initialement conçue par l'**Office national d'étude et de recherches spatiales** (**Onera**).

Bien sûr, cette mission, dirigée par le physicien Jacques Labeyrie, doit répondre prioritairement aux interrogations posées par les expérimentations nucléaires

CEA

La première expérience spatiale du CEA, le 27 janvier 1959. Un compteur Geiger a été installé à bord d'un missile pour une des premières mesures des rayons gamma du ciel.

aériennes et donc par l'éventuelle dissémination de matières radioactives dans la haute atmosphère. Mais la batterie de compteurs Geiger embarquée sur ce missile se révèle aussi capable de mesurer le rayonnement gamma du ciel. Si l'expérience peut conclure à l'absence de radioactivité dans la haute atmosphère, elle réalise également une avancée mondiale dans le domaine de l'astrophysique : un des tout premiers enregistrements de rayons gamma en provenance du cosmos. Jusque-là, nul chercheur n'avait imaginé que l'Univers produisait de tels rayons. Et pour cause : excepté la lumière visible capable d'atteindre la surface de la Terre, la plupart des autres rayonnements sont arrêtés par l'atmosphère. Donc, depuis les débuts de l'astronomie, il y a plus de 2000 ans, les astronomes n'ont eu aucun moyen de capter les autres lumières cosmiques. C'est à peine si le rayonnement radio de la **galaxie** fut découvert, en 1932, par le physicien américain Karl Jansky et si les Allemands démontraient l'émission de rayon X par le **Soleil** grâce à une fusée V2. Ce résultat propulse le CEA parmi les experts mondiaux de l'astrophysique, une position qu'il ne quittera plus. Cinquante ans plus tard, une autre génération de chercheurs, désormais réunis au sein du SAp, vient de livrer une caméra de très haute technologie destinée au cœur d'Herschel, le plus grand télescope spatial jamais satellisé mais aussi petit bijou de la recherche, sachant capter les plus faibles rayonnements infrarouges de l'Univers. Entre ces deux performances, les astrophysiciens du SAp marqueront de leur empreinte chaque étape d'une des plus excitantes aventures scientifiques de tous les temps : la détection des rayonnements « invisibles » du cosmos, totalement inaccessibles à nos yeux humains seulement adaptés à la lumière de notre **étoile**, le Soleil.

Réussir avec les moyens du bord

En juin 1962, une importante découverte bouleverse, à nouveau, la conception que les astrophysiciens se font alors du ciel. On la doit à une équipe américaine, dirigée par Roberto Giacconi, Prix Nobel en 2002. Celui-ci imagine de placer des détecteurs de rayons X à bord d'une fusée *Aerobee* pour tenter de mesurer les rayons X du Soleil réfléchis par la surface de la Lune. Aucun rayon ne put être capté par la Lune mais, en balayant le ciel, les instruments embarqués reçurent une forte bouffée de rayons X en provenance d'une région de la constellation du Scorpion. Baptisée Scorpius-X1, cette source restera longtemps une énigme pour les astrophysiciens. Il faudra plus de cinq ans pour comprendre que les rayons X de l'Univers proviennent d'étoiles exotiques très denses, de **naines blanches**, d'**étoiles à neutrons** ou même de **trous noirs**. Avec cette découverte s'ouvrait une nouvelle fenêtre d'observation sur le cosmos.

À cette époque, la France n'a pas encore développé son programme de fusée, aussi les chercheurs du CEA durent-ils faire preuve d'ingéniosité pour continuer leurs observations. Faute de mieux, l'idée leur vint d'embarquer leurs instruments de mesure sur des ballons stratosphériques pouvant s'élever à 40 kilomètres d'altitude.

Le 21 mai 1965, un vol inaugural se déroule sur la base d'Aire-sur-l'Adour (Landes) avec les moyens du bord. Par exemple, pour protéger les détecteurs du vide et du froid, les astrophysiciens utilisent une cocotte-minute et du polystyrène ; pour enregistrer leurs données, ils ne disposent que d'un simple magnétophone à bande du commerce. Récupéré après le vol, ce simple enregistreur offrira au CEA l'une de ses premières historiques : la détection de rayons X de haute énergie émanant de plusieurs sources situées dans la constellation du Cygne.

Pourtant, les chercheurs n'en sont qu'à leurs premiers étonnements. En 1967, des radioastronomes anglais découvrent des signaux radio rapides et réguliers dans le ciel. Une fois écartée l'hypothèse, brièvement envisagée, de signaux émis par des extraterrestres, une autre supposition voit le jour : ces « pulsations » proviendraient d'étoiles à neutrons, en rotation très rapide, baptisées **pulsars** pour *pulsating stars*.

CEA

Découverte des rayons X cosmiques : préparation et envoi d'un ballon stratosphérique depuis Aire-sur-l'Adour (mai 1965).

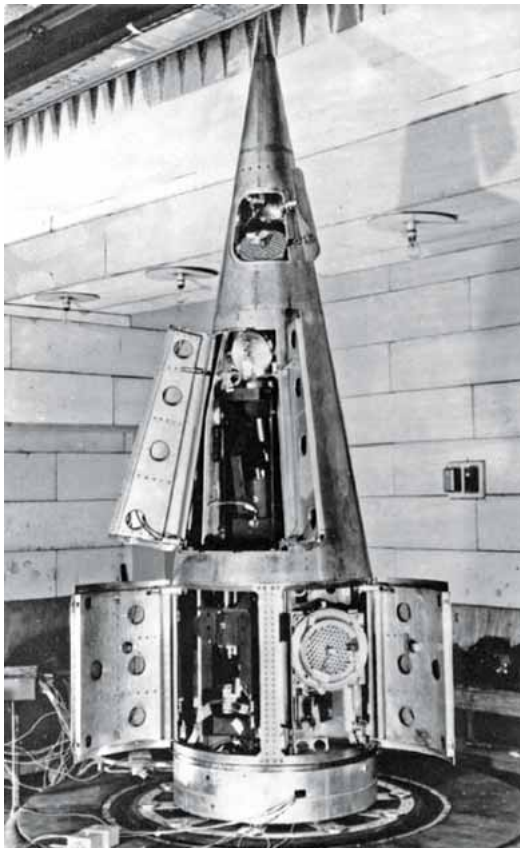
CEA

Charge portée par le ballon : détecteurs protégés du vide dans une cocotte-minute étanche et données enregistrées sur un magnétophone à bande récupéré après le vol (mai 1965).

Entre Kourou et Gap

Entre-temps, la France a développé son programme de fusées *Véronique*. Les astrophysiciens ne laissent pas passer l'occasion. En 1967, l'équipe de Robert Rocchia embarque les détecteurs déjà développés par le CEA pour l'étude de la radioactivité. Terrible déception : la tentative échoue car les portes de la fusée ne se sont pas ouvertes. Ce ne sera que partie remise et le succès arrive, tel un cadeau de Noël, le 23 décembre 1968, depuis la nouvelle base spatiale de Kourou (Guyane), tout juste quelques mois après son inauguration. Les résultats de l'expérience s'avèrent probants : pendant les 200 secondes que dure l'observation, environ 25 000 rayons X sont enregistrés en provenance d'un des plus puissants pulsars de la galaxie. Les astrophysiciens du CEA viennent d'établir que les pulsars émettent des rayons X de haute énergie – une première.

Ils n'en resteront pas là puisque, l'année suivante, ils tentent un nouveau défi : utiliser un tout nouveau détecteur dédié aux rayons gamma en provenance de pulsars. Cet instrument complexe a été mis au point par Bruno Parlier, Bernard Agrinier et Yves Koechlin, du CEA, en collaboration avec Giuseppe Occhialini, célèbre physicien de l'université de Milan. En fait, il s'agit d'une chambre à étincelles, autrement dit une enceinte à vide sous tension contenant un empilement de plaques de plomb capables de stopper les rayons gamma puis de les désintégrer en particules chargées produisant des traces d'étincelles. Pour reconstituer la direction du rayon gamma, ces traces sont photographiées grâce à une caméra de film 16 mm. Cette fois, l'opération se déroule à Gap (Hautes-Alpes). Un ballon emporte le détecteur à 40 000 mètres d'altitude. Les résultats sont une nouvelle fois au rendez-vous des chercheurs du CEA qui démontrent, les premiers, que les pulsars émettent aussi des rayons gamma dans l'Univers.



CEA

Première détection des rayons X de haute énergie des pulsars : tête de fusée française Véronique portant les détecteurs de rayons X (décembre 1968).

Du ballon au satellite

La poursuite des recherches suppose alors de vaincre une limitation essentielle : la durée de vie trop courte des ballons et des fusées. Pour cela, il faut pouvoir disposer de satellites scientifiques et accéder ainsi durablement à l'espace. L'Europe devra attendre 1972 pour disposer d'un tel satellite, TD-1. Les astrophysiciens du CEA exploitent cette première opportunité qui leur est offerte en plaçant trois de leurs instruments sur le satellite qui tournera en orbite jusqu'en 1974. Parmi eux, S-133, une toute nouvelle chambre à étincelles de 40 kg, munie cette fois d'une caméra électronique de télévision baptisée VIDICON. Malheureusement, ce vol sera un échec, la proximité d'autres instruments ayant induit un formidable bruit de fond de particules parasites et noyé l'expérience sous de fausses détections. Cet apprentissage profitera au satellite Cos-B, lancé en août 1975, avec une chambre à étincelles de 114 kg, fruit d'une large collaboration européenne. Avec une longévité affichée de sept ans, ce projet volera la vedette à son concurrent américain, SAS-II, programmé pour seulement six mois, mais aussi en raison d'un résultat scientifique majeur : l'obtention de la première image complète de la galaxie en rayons gamma.

L'exploration du domaine des hautes énergies X et gamma se poursuivra jusqu'à aujourd'hui grâce à l'implication du CEA dans les missions SIGMA/Granat (1989), XMM-Newton (1999) et INTEGRAL (2002). Désormais, la vision des astrophysiciens s'ouvre sur des milliers de sources témoignant de cet Univers violent où les températures se chiffrent en millions de degrés. En revanche, du côté du rayonnement infrarouge, les obstacles ne se laisseront pas vaincre facilement : d'abord, l'atmosphère reste un écran à franchir et ensuite, la technologie des détecteurs, issue du domaine militaire, ne suit pas toujours les besoins des

CEA

Ensemble de fusée Skylark pour la détection des sources célestes de rayons X (1972).

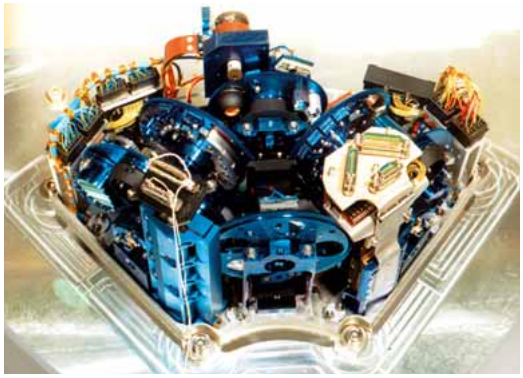
chercheurs. L'implication du CEA vers ce nouveau domaine résultera d'une circonstance fortuite, à savoir le retard pris par les collaborations internationales sur les hautes énergies à la suite d'un double événement : l'accident de la navette américaine Challenger, en 1986, et la disparition de l'ex-URSS, en 1991.

En attendant la grande symphonie du cosmos...

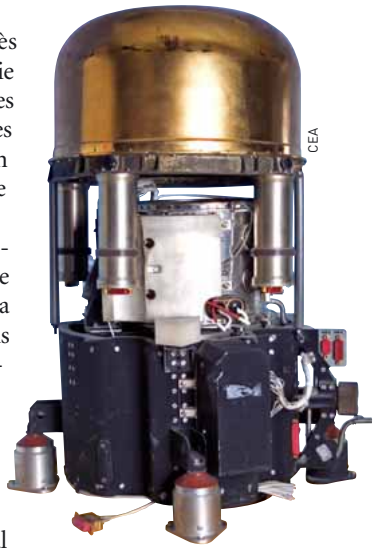
L'Europe décide alors de relever le défi avec son projet de satellite ISO (pour *Infrared Space Observatory*), conçu pour embarquer la première caméra infrarouge dans l'espace. Il faut dire que le satellite astronomique américain IRAS (pour *Infrared Astronomical Satellite*), lancé en 1983 pour six mois, n'avait donné qu'un premier aperçu du ciel infrarouge. Pourtant, aucun laboratoire européen ne semble en mesure de construire la caméra d'ISO. Seules deux unités du CEA, le SAp et le Laboratoire d'électronique de technologies de l'information (Leti) peuvent s'engager à fournir les détecteurs de l'instrument et assurer leur intégration dans un ensemble optique complexe pesant moins de 10 kg. Sous l'impulsion de Catherine Cesarsky, ISOCAM (la caméra d'ISO) rejoint l'espace, en 1995, pour trois ans. Avec sa batterie de détecteurs semi-conducteurs de seulement 32 x 32 **pixels**, cette caméra réalisera une mosaïque d'images révélant tout le détail des **nébuleuses** de gaz et de poussières où naissent les étoiles. Elle n'est surpassée aujourd'hui que par le récent satellite Spitzer.

Aujourd'hui, dans le vaste arc-en-ciel de l'invisible, un seul domaine demeure encore inexploré : celui de l'infrarouge lointain, proche des **ondes** radio. Pour relever ce nouveau défi de l'observation de ce rayonnement de très faible énergie, il faut repousser encore plus loin les limites actuelles de la technologie. La caméra du futur est équipée de détecteurs spécifiques, appelés **bolomètres**. Le défi consiste à éviter qu'elle ne se fasse aveugler par son environnement. Pour y parvenir, les astrophysiciens doivent obtenir leur refroidissement jusqu'à quelques millidegrés au-dessus du zéro absolu. Certaines de ces caméras fonctionnent déjà depuis le sol à partir d'étroites fenêtres atmosphériques laissant passer une partie de ce rayonnement. Mais la première grande exploration se fait désormais depuis l'espace grâce au satellite Herschel de l'**Agence spatiale européenne** (**ESA**) lancé avec succès le 14 mai 2009. À son bord, il emporte PACS (pour *Photoconductor Array Camera and Spectrometer*), caméra dotée de la plus grande matrice de bolomètres jamais construite, un succès majeur pour le CEA. Comme toutes les vraies avancées scientifiques, comme tous les succès techniques, PACS incite pourtant à la modestie si l'on compare la taille de cette caméra et ses 2 048 éléments d'image, avec celle des grandes caméras astronomiques dédiées à l'observation de la lumière visible dotées, elles, de centaines de millions d'éléments d'image.

Dans beaucoup de domaines encore, les « lunettes » des chercheurs dépassent à peine celle de Galilée. L'exploration spatiale de l'invisible a toujours dû s'adapter au rythme des innovations technologiques : chaque fois, des outils spécifiques durent être inventés et surtout portés au-delà de l'atmosphère. Ainsi, petit à petit, la part inconnue de l'Univers se réduit inexorablement. Pendant longtemps, les astrophysiciens ont donc été dans la position d'un mélomane qui n'entendrait que le son d'un seul instrument dans l'interprétation d'un ensemble musical mais qui, progressivement, élargirait sa perception à l'ensemble de l'orchestre. Aujourd'hui, le vœu des scientifiques serait de pouvoir enfin écouter l'ensemble de la grande symphonie du cosmos.


CEA

Caméra ISOCAM pour l'infrarouge (novembre 1995).


CEA

Première chambre à étincelles satellisée : expérience S 133 embarquée à bord du satellite européen TD-1 (mars 1972).

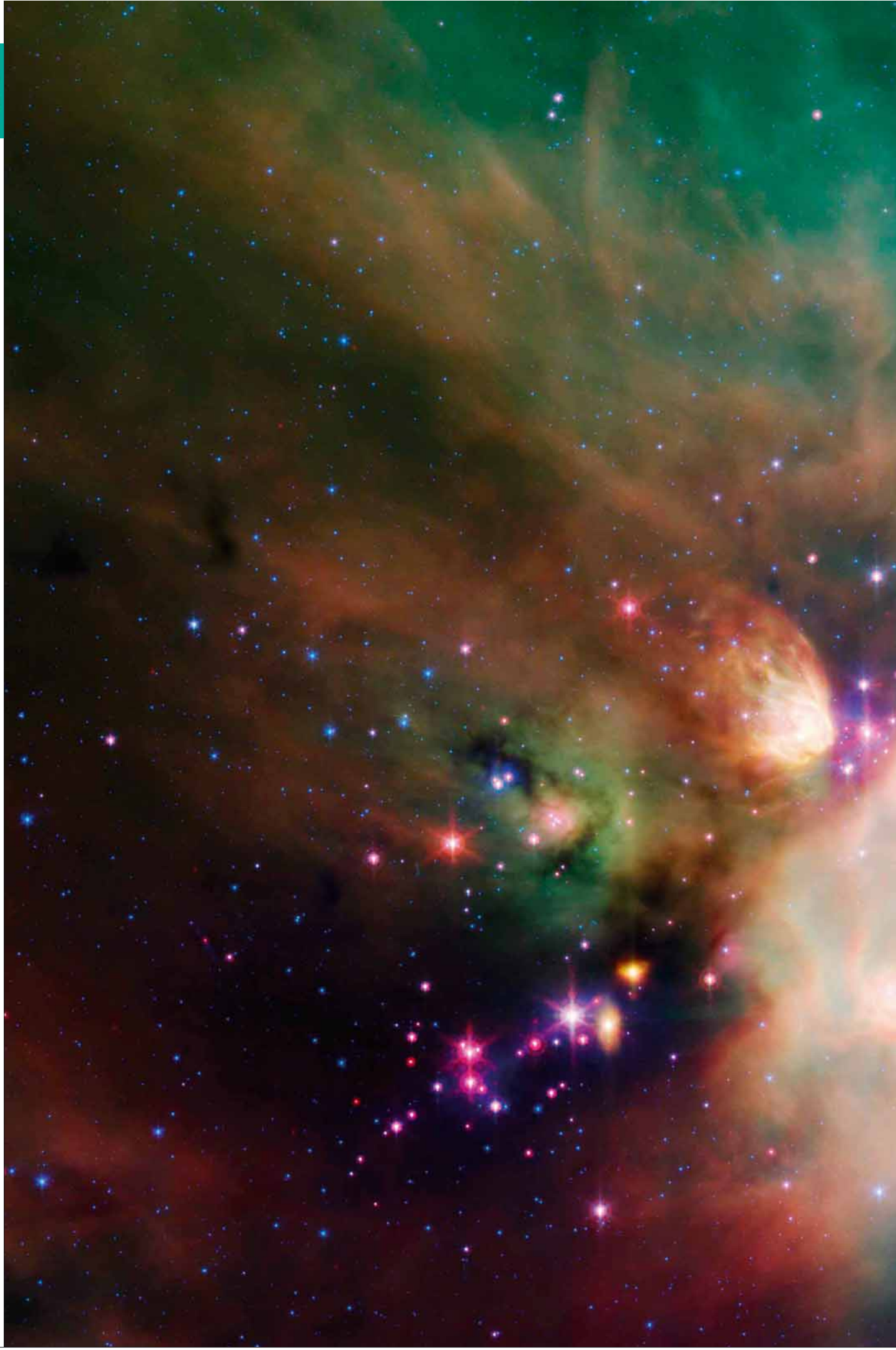
> Jean-Marc Bonnet-Bidaud
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS).
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Rayonnements cosmiques : les dates clés de leur découverte

Il ne faut pas se fier aux couleurs que nous donne à voir l'arc-en-ciel car il ne s'agit que d'une infime fraction de la palette des couleurs existantes. Notre œil humain ne peut les percevoir étant uniquement adapté à la lumière de notre étoile, le Soleil. C'est donc grâce aux travaux en laboratoire que d'autres rayonnements ont pu être découverts, étape par étape, par les chercheurs :

- 1800 : Le physicien William Herschel, s'aidant d'un simple prisme et de thermomètres, parvient à démontrer qu'en-deçà « du rouge » existe un autre rayonnement capable de chauffer le thermomètre : l'infrarouge. Il s'agit de la première avancée véritablement significative.
- 1800 : Procédant à une expérience similaire, Wilhem Ritter découvre qu'au-delà « du violet » un rayonnement s'avère capable de noircir le papier d'argent : c'est l'ultraviolet.
- 1810 à 1864 : James Maxwell unifie l'électricité et le magnétisme, ce qui lui permet d'avancer que la lumière visible n'est que le cas particulier d'un phénomène plus général : les ondes électromagnétiques.
- 1895 : Wilhelm Röntgen découvre que les décharges électriques dans les tubes à vide produisent des rayons encore inconnus (qu'il baptise donc rayons X) capables de traverser le verre.
- 1896 : Henri Becquerel découvre la radioactivité naturelle : de l'intérieur des noyaux d'atomes d'uranium émanent des rayonnements inconnus qui impressionnent les plaques photographiques.
- 1898 : Pierre et Marie Curie découvrent d'autres matériaux « radioactifs » (le polonium, le thorium, le radium), lesquels émettent des rayonnements baptisés rayons alpha et bêta (en réalité des particules).
- 1900 : Paul Villard découvre un rayonnement radioactif capable de traverser le plomb : le rayonnement gamma.

Pour la plupart, ces rayonnements sont arrêtés à différentes altitudes de l'atmosphère. L'astrophysique spatiale permet seule de les capter et donc de les étudier. Aujourd'hui, cette discipline fête tout juste ces 50 ans.



Le nuage de Rho Ophiuchi, un des nuages sombres de la Galaxie situé dans la constellation d'Ophiuchus à une distance de 400 années-lumière du Soleil, vu en infrarouge par le satellite Spitzer. Ce nuage abrite le plus proche exemple connu d'un amas d'étoiles de type solaire en gestation.

NASA/JPL-Caltech/Harvard-Smithsonian CfA

I. L'ASTROPHYSIQUE ET L'EXPLORATION DE L'UNIVERS

Que sont la Lune, le Soleil, les étoiles ? Pourquoi se déplacent-ils au cours du temps ? Ont-ils toujours été là ? De ces interrogations sont nés les grands récits de création et les cosmogonies. Les progrès des moyens d'observation, de l'œil nu aux satellites modernes, en passant par la lunette de Galilée et les télescopes géants, ont transformé la contemplation en astronomie, puis en astrophysique. La spéculation intellectuelle n'a pas disparu pour autant : l'astrophysique moderne repose sur un constant va-et-vient entre l'observation et l'élaboration de théories explicatives. L'entrée en lice des ordinateurs a introduit dans le jeu un troisième élément, l'expérimentation numérique, qui consiste à observer le comportement de modèles informatiques décrivant les objets de l'Univers.

Qui voit loin dans l'espace remonte le temps. L'astronomie repose sur ce constat imposé par le fait que la lumière se propage à une vitesse finie. Il en résulte que plus les moyens d'observation sont puissants, plus ils révèlent un Univers « jeune », voire primordial. Car l'Univers n'est pas éternel. Il a bel et bien une histoire, que les astrophysiciens s'efforcent aujourd'hui de retracer en détail. Selon le scénario communément admis, dit à « big bang », l'Univers est en expansion depuis 13,7 milliards d'années. Le fond diffus cosmologique nous montre que, âgé de 380 000 ans, l'Univers était encore très dense, très chaud et quasiment homogène. À partir des minuscules grumeaux de cette « soupe » primordiale, la gravité a engendré les structures hautement hiérarchisées que nous connaissons aujourd'hui avec ses étoiles regroupées en galaxies, elles-mêmes assemblées au sein d'amas de galaxies. Ces objets eux-mêmes naissent et meurent, modifiant les conditions de naissance, et donc les caractéristiques, des générations ultérieures.

Est-ce à dire que le scénario est désormais écrit ? Certes pas. Beaucoup reste à apprendre sur la formation de ces objets et l'origine de leur diversité. De plus, cet approfondissement n'est pas à l'abri de surprises de taille, voire de remises en cause radicales. Que l'on songe par exemple à la découverte de planètes extrasolaires, détectées depuis 1995 et vues directement pour la première fois en novembre 2008. Ou à l'existence d'une matière noire, supposée dès 1933 et toujours pas identifiée. Plus mystérieuse encore est l'énergie noire, introduite en 1998 pour expliquer l'accélération « récente » de l'expansion universelle.

Les astrophysiciens comptent beaucoup sur une nouvelle génération d'instruments, qu'ils soient dans l'espace (Fermi, Herschel, Planck, James Webb) ou au sol (ALMA, ELT). Sans oublier le LHC, nouvel accélérateur du Cern, puisque la physique des particules, science de l'infiniment petit, et l'astrophysique, science de l'infiniment grand, se rejoignent pour comprendre les premiers instants de l'Univers.

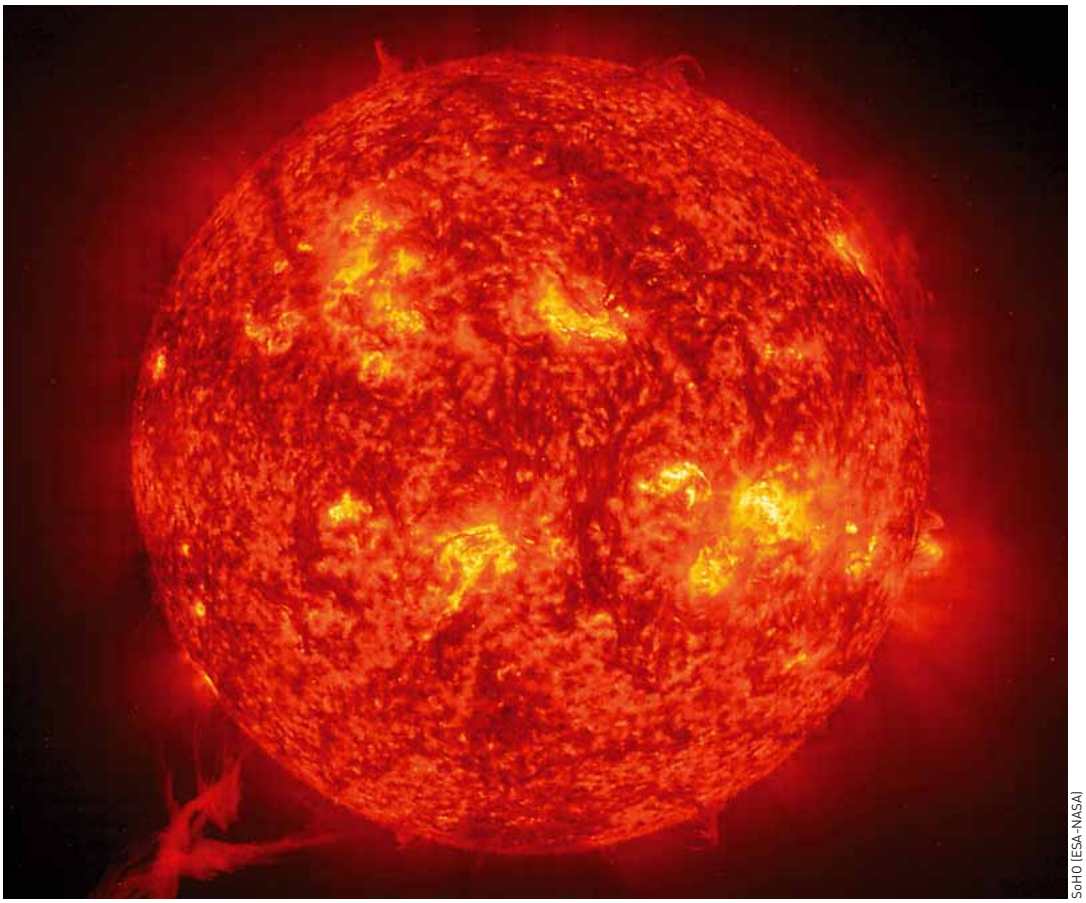
Restent enfin les questions fondamentales de la forme et de la finitude de l'Univers. Étonnamment, ces interrogations essentielles pourraient recevoir des réponses avant que les « détails » fins de l'histoire des objets soient élucidés.

Bien qu'elles nous paraissent éternelles, les étoiles naissent, vivent et meurent. Dès sa naissance dans les nuages moléculaires interstellaires, la masse du nouvel astre détermine son destin : durée de vie, couleur et devenir final. Durant leur vie « adulte », les étoiles se comportent comme d'immenses réacteurs thermonucléaires « brûlant » de l'hydrogène pour synthétiser des éléments chimiques plus lourds, jusqu'au fer pour les plus massives. Objets en rotation, sièges de courants de convection, arborant pour la plupart une intense activité magnétique, les étoiles mènent une existence agitée. Les étoiles moyennes et petites finissent leur vie comme des naines blanches. Les plus grosses s'effondrent en une gigantesque débauche d'énergie, produisant des supernovae avant de se transformer en étoiles à neutrons ou en trous noirs. Ces explosions disséminent leurs couches extérieures. Paradoxalement, c'est donc lors de leur mort que les étoiles fécondent l'espace interstellaire en éléments nouveaux. Comprendre le scénario de leur naissance et l'origine de leur masse, c'est donc approcher l'origine de la composition de l'Univers.

Les **étoiles** ensemencent l'Univers

Les enseignements du Soleil

Le Soleil est sans doute une étoile « banale ». Sa proximité lui confère cependant un statut particulier : celui de laboratoire de physique stellaire et de plasmas denses. Il est maintenant étudié comme une étoile magnétique en interaction avec la Terre.



SoHO (ESA-NASA)

Source de la vie sur Terre, longtemps divinisé, le Soleil est devenu ces dernières années un véritable laboratoire de physique. Les scientifiques l'auscultent pour mieux comprendre l'évolution des étoiles, mais aussi le comportement des plasmas denses.

Il y a un siècle, personne ne savait ce qu'était une **étoile**. Étant donné ce qu'ils connaissaient de la **masse** et de la composition du **Soleil**, les scientifiques pensaient que sa température interne atteignait 15 millions de degrés, et sa densité plus de cent fois celle du solide. Des conditions totalement inaccessibles sur Terre. Toutefois la **thermodynamique** des gaz et la **gravité** conduisaient à une durée de vie de quelques millions d'années seulement pour notre étoile, contre quelques milliards d'années pour la Terre ! Ce n'est qu'avec l'avènement de la physique nucléaire – qui s'intéresse aux **noyaux** des **atomes**, à leurs constituants et leurs **interactions** – qu'a été découverte la source d'énergie interne qui compense l'effet inévitable de la gravité.

Le Soleil et l'atome

Très vite, ce domaine fascinant a fait progresser notre compréhension des étoiles. Les réactions nucléaires, qui transforment des **noyaux légers** en **noyaux** plus **lourds**, constituent donc la source d'énergie manquante. En ce qui concerne le Soleil, il s'agit essentiellement de la **fusion** de noyaux d'**hydrogène** (le plus simple de tous les noyaux puisqu'il ne comprend qu'un **proton**) pour donner de l'**hélium** (le plus petit des autres : deux protons et deux **neutrons**). Le premier à relier ce monde de l'infiniment petit à celui de l'infini grand, en 1920, fut l'astrophysicien anglais Arthur Eddington. En 1929, les physiciens britannique Robert d'Escourt Atkinson et allemand Friedrich Houterman publient un article conjoint, expliquant qu'aux températures régnant au centre des étoiles, les atomes sont généralement dépouillés de tous leurs **électrons**, et donc chargés positivement. Il se forme alors un **plasma**, sorte de « soupe » constituée d'**ions** positifs et d'**électrons libres** négatifs. La température, donc l'agitation, y est telle que deux charges électriques de même signe, au lieu de se repousser comme dans le monde ordinaire, peuvent surmonter la **barrière coulombienne** pour interagir. À la même époque, George Gamow, un physicien d'origine ukrainienne, montre que cette interaction requiert une énergie supérieure à l'énergie thermique. C'est pourquoi seul un petit nombre de protons est concerné. Il ne se produit en fait qu'une réaction par centimètre cube et par an dans le Soleil. Cette « rareté » explique la longévité de l'astre. Il faut en effet environ 10 milliards d'années pour transformer près de la moitié de la masse du Soleil d'hydrogène en hélium. Autre enseignement essentiel : cette interaction, dite *faible*, remet en cause l'idée que le proton et le neutron sont des particules fondamentales puisque l'un se transforme en l'autre. Elle nécessite l'intervention d'une nouvelle particule imaginée par l'Autrichien Wolfgang Pauli en 1930, le **neutrino**, dont la masse n'est toujours pas connue.

Après cette phase de transformation d'hydrogène en hélium, le cœur du Soleil va se contracter et sa température centrale augmenter. Elle sera alors suffisante pour que les noyaux d'hélium surmontent la barrière coulombienne (2,5 fois plus forte que dans le cas de l'hydrogène) et interagissent à leur tour.

University of Colorado

George Gamow, connu pour sa participation à la théorie du **big bang**, a joué un rôle crucial dans la compréhension des réactions nucléaires intervenant dans les étoiles. Il a démontré qu'à cause de la répulsion coulombienne, elles ne peuvent avoir lieu que si les vitesses relatives des réactants sont très élevées. Ainsi la réaction proton-proton, base de la transformation d'hydrogène en hélium ($4\,p + 2\,e^- \rightarrow {}^4He + 2\,\nu_e + 27$ **MeV**), se produit-elle à 5 **keV** et non pas à 1,3 keV (correspondant aux 15 millions de degrés régnant au cœur du Soleil). C'est pourquoi elles sont plus rares que prévu, ce qui explique la longévité du Soleil.

De la théorie à l'expérience

Pendant longtemps, ces résultats sont restés purement théoriques car impossibles à tester au laboratoire. Il fallait donc les confronter à la réalité en « sondant » le Soleil lui-même. C'est devenu possible très récemment, avec le lancement en 1995 du satellite SoHO (*Solar and Heliospheric Observatory*), placé au **point de Lagrange L1**. Il emporte une douzaine d'instruments, dont GOLF (*Global Oscillations at Low Frequencies*) et MDI (*Michelson Doppler Imager*), deux appareils de mesures **héliosismiques** – ils observent la propagation des **ondes** acoustiques au sein de l'astre, les « tremblements de Soleil » en quelque sorte. Leurs données, confrontées au CEA avec des **modèles numériques** de l'étoile, ont confirmé des prévisions comme la distribution maxwellienne[1] des vitesses des particules. Elles ont également permis de déterminer avec une précision de 1 % la probabilité d'interaction entre deux protons. Cette valeur était jusque-là estimée théoriquement, en s'appuyant sur la durée de vie du neutron.

(1) Distribution maxwellienne : les particules n'ont pas toutes la même vitesse mais des vitesses réparties aléatoirement autour d'une moyenne.

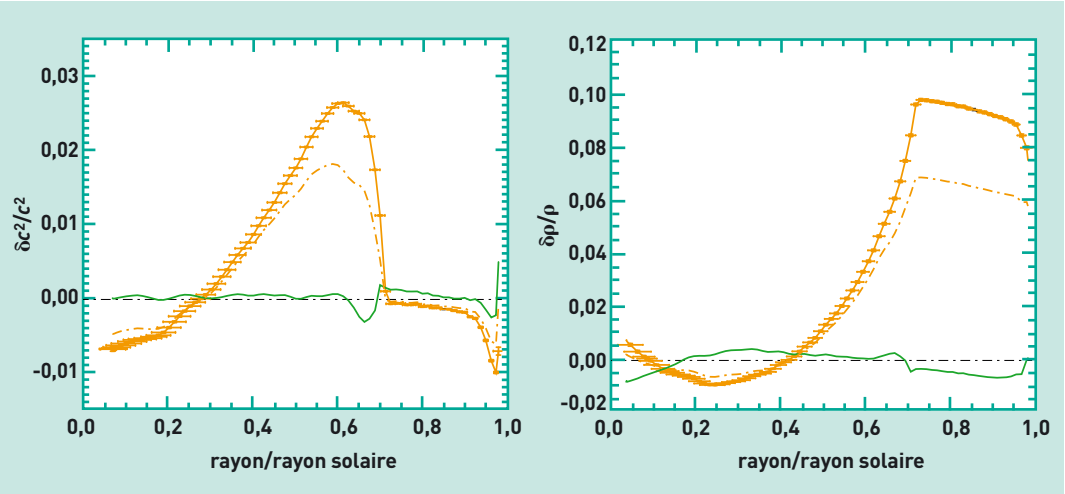
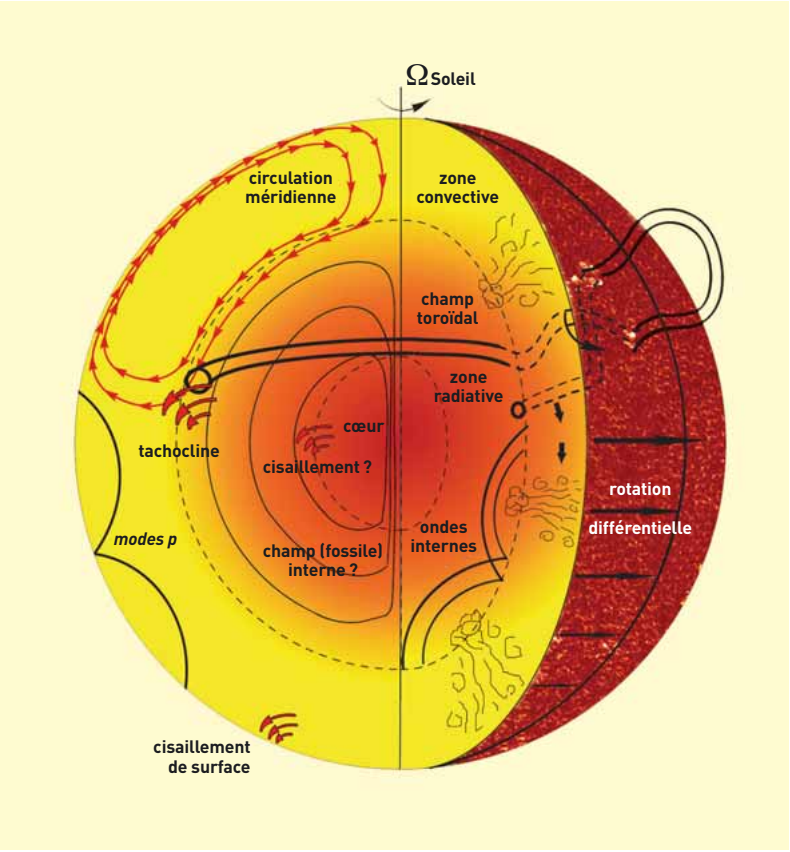


Figure 1.
À gauche, différence radiale du carré de la vitesse du son (*c*) extraite des modes acoustiques détectés par les instruments GOLF et MDI, et celle obtenue avec un modèle sismique du Soleil (en vert) ou avec un modèle classique basé sur les abondances solaires déterminées par les raies d'absorption dans la photosphère (en orange, deux valeurs de composition sont ici montrées). À droite, différence obtenue pour la densité du plasma (ρ) qui varie entre 150 g/cm^3 au cœur et 10^{-7} g/cm^3 dans l'atmosphère solaire.

Les mesures sismiques confirment également des hypothèses générales sur l'évolution des étoiles. En effet les équations qui régissent cette évolution (**équilibre hydrostatique**, transfert d'énergie par rayonnement ou **convection**, conservation de la masse, évolution temporelle des abondances[2]…) permettent de calculer le profil actuel de la vitesse du son dans le Soleil et de le comparer à ce qui est extrait de la mesure des nombreux modes acoustiques (figure 1). En introduisant les résultats des mesures sismiques réelles dans ces modèles numériques, les chercheurs prédisent le flux de neutrinos émis par les réactions nucléaires[3]. Or des installations de détection des neutrinos solaires mesurent ce flux au Japon, au Canada, en Italie et en Russie. L'accord remarquable entre l'héliosismologie et la détection des neutrinos, après 30 ans de recherche, souligne la complémentarité de ces deux disciplines. Les processus régissant les grandes étapes de l'évolution des étoiles de masse comparable au Soleil semblent donc aujourd'hui bien compris.



A. S. Brun/CEA

Figure 2.
Vision dynamique de l'intérieur solaire montrant les deux zones classiques : en rouge la région radiative et en jaune la région où le transport d'énergie est dominé par la convection. Se surimposent des circulations méridiennes, des ondes acoustiques (*modes p*) et des ondes internes, ainsi que des champs magnétiques avec des composantes poloïdales et toroïdales.

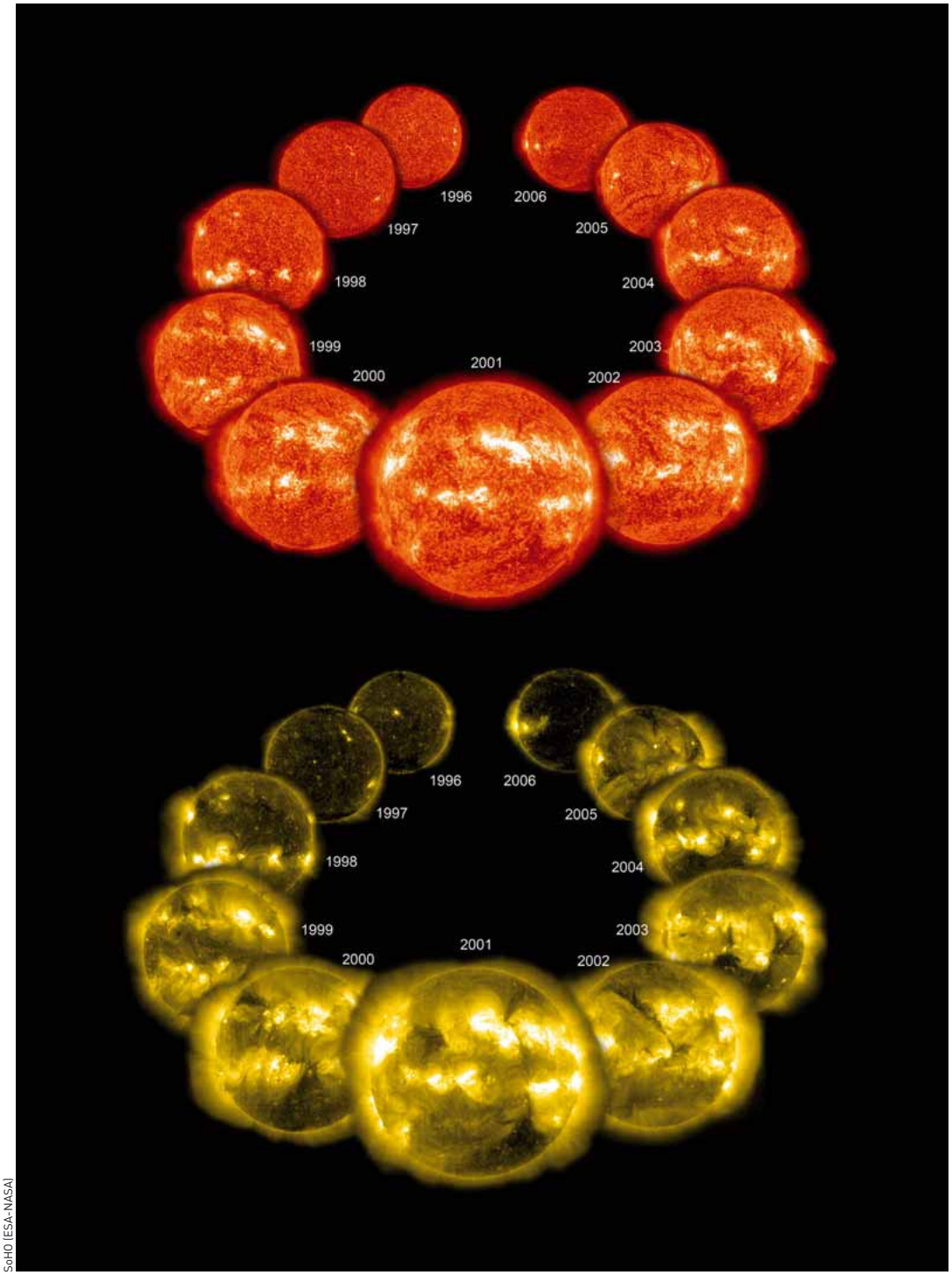
Dépasser le cadre classique

De nombreuses questions restent cependant sans réponse. Par exemple, des mesures récentes de la composition solaire conduisent à des désaccords très importants entre le modèle classique du Soleil et celui déduit des observations sismiques (figure 1). Des expériences en laboratoire devraient permettre de tester le rôle d'un deuxième ingrédient fondamental de l'évolution stellaire : le transport d'énergie par les **photons**. D'autre part, les phénomènes comme les **taches**, protubérances, courants, ou éruptions solaires ne sont pas décrits dans le cadre conceptuel classique de l'évolution des étoiles. L'origine de cette **activité solaire** reste mystérieuse, et il est impossible de prédire exactement la durée et l'amplitude des **cycles d'activité**. Les équations classiques de l'évolution stellaire négligent en effet des faits essentiels : les étoiles tournent, éjectent de la matière et sont en général actives (voir *Du Soleil aux étoiles*, p. 16). Cette « impasse » est

(2) Les proportions relatives des différents éléments.

(3) Il s'agit des réactions proton-proton (dites pp) et du **cycle CNO** (carbone-azote-oxygène).

(4) D'après l'astronome américain George Ellery Hale (1868-1938).



SoHO (ESA-NASA)

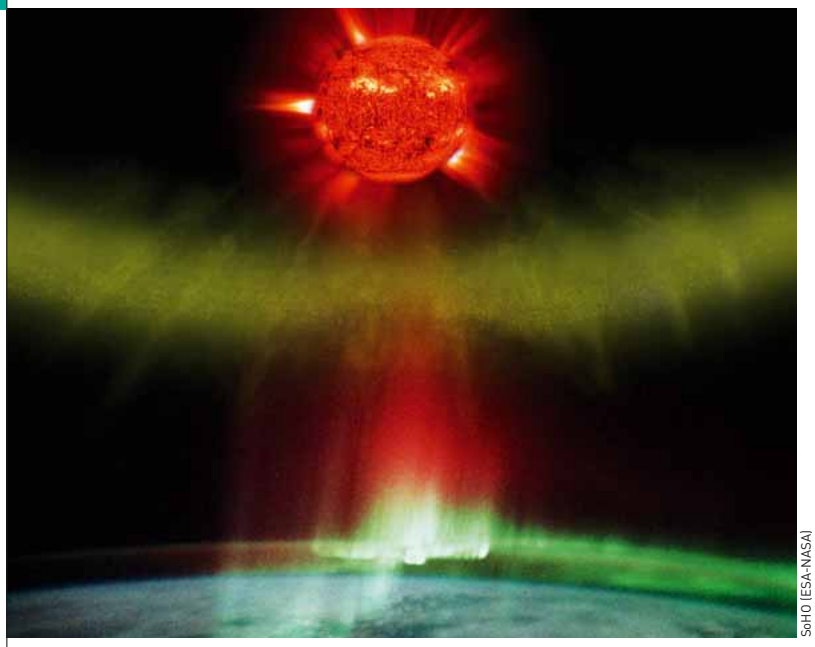
Figure 3.
Le satellite SoHO a observé le Soleil à plusieurs hauteurs de l'atmosphère (en haut à 60 000 - 80 000 K et, en bas, à 2 000 000 K) entre la photosphère (la surface visible de l'astre) et la couronne. Ceci permet de suivre l'évolution de son magnétisme entre deux minima (1996-2006). Clairement, les variations du champ magnétique prennent de plus en plus d'importance avec l'éloignement de la photosphère.

d'ailleurs justifiée car la rotation ou le **champ magnétique** interne n'ont qu'un faible impact sur la structure interne… que veulent précisément décrire ces équations.

Pour dépasser ce cadre conceptuel et aller vers une vision complète et unifiée du Soleil, il faudra là encore exploiter les mesures de SoHO, qui observe toutes les manifestations de la dynamique solaire, qu'elles soient internes ou externes (figure 2). En utilisant les **raies d'absorption** du fer et de l'hélium dans l'atmosphère solaire, le satellite explore des températures très différentes allant de quelques dizaines de milliers de degrés à plusieurs millions de degrés entre la **photosphère** et la **couronne** (figure 3). La longévité de ce satellite permet de suivre l'évolution de tous les indicateurs au cours du cycle d'activité solaire. D'une durée d'environ onze ans, ce cycle dit *de Hale*[4] est connu depuis Galilée. Il est caractérisé par la migration des taches solaires d'une latitude de 60° vers l'équateur. Lorsque le champ magnétique dipolaire s'inverse, le nombre de taches s'amenuise ou disparaît, puis un deuxième cycle s'amorce. Le retour aux polarités initiales demande environ 22 ans.

Un astre bien agité

Les astrophysiciens du CEA veulent aujourd'hui comprendre la ou les sources internes d'activité du Soleil, pour mieux en apprécier la variabilité. En effet un Soleil très actif éjecte des particules qui



SoHO (ESA-NASA)

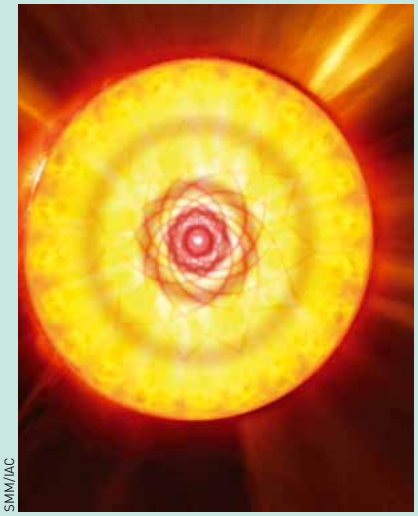
Une aurore boréale. Ce phénomène est dû à la pénétration dans la haute atmosphère terrestre d'un flux de particules en provenance du Soleil.

s'échappent de la couronne solaire. Ces flux de particules réguliers ou épisodiques – pour les phénomènes les plus violents – arrivent jusqu'à la **magnétosphère** qui protège notre planète. Toutefois, une partie de ces particules contourne la Terre et pénètre les hautes couches atmosphériques par les pôles, donnant naissance aux **aurores boréales**. Ce phénomène entraîne parfois des perturbations atmosphériques, et soumet les pilotes ou les astronautes à des flux conséquents de particules. Il a donc été décidé de suivre ces événements de leur création, au niveau de la couronne solaire, à leur arrivée dans l'environnement de la Terre. Selon l'énergie de ces particules, ce trajet dure quelques jours.

En fait, le cycle de Hale n'est pas très régulier. SoHO a clairement montré que les phénomènes dynamiques internes du Soleil déterminent son activité. Un ensemble de processus magnétiques et mécaniques interfèrent de manière complexe. Le phénomène de **dynamo** – la création d'un champ magnétique par la circulation de particules électriquement chargées – régénère cette activité et implique l'ensemble de la **région convective**.

Sonder l'intérieur des étoiles

Jusqu'à la deuxième moitié du 20e siècle, les astronomes ne disposaient d'aucune donnée expérimentale provenant directement de l'intérieur des **étoiles**. Ils devaient se contenter de paramètres globaux ou de surface : rayon, masse, **luminosité**, **spectre électromagnétique**... La détection des **neutrinos** solaires, porteurs d'une information sur les conditions **thermodynamiques** régnant au centre du **Soleil**, a repoussé quelque peu ces limites. Les astrophysiciens restaient cependant sur leur faim : comment « pénétrer » à l'intérieur du Soleil – et des étoiles – pour connaître les phénomènes physiques se déroulant à toutes les profondeurs ?



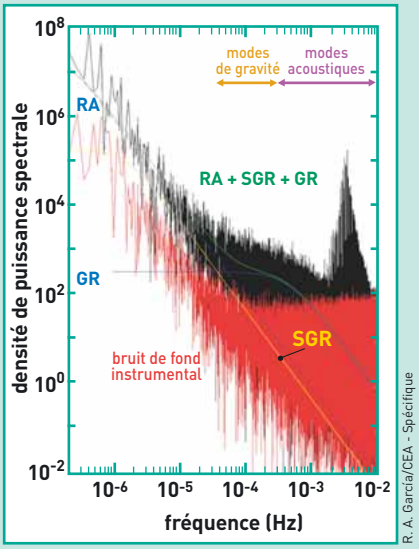
SMM/JAC

Vue d'artiste de l'intérieur du Soleil montrant les trajectoires des modes de gravité pendant leur propagation dans la **zone radiative**, partie la plus interne du Soleil (70 % en rayon).

Une nouvelle approche expérimentale, l'**astérosismologie**, a apporté une réponse. Elle s'inspire de la sismologie terrestre, qui analyse la propagation souterraine des **ondes** acoustiques générées par les tremblements de terre ou des explosions contrôlées. De la même manière, l'astérosismologie – dite **héliosismologie** lorsqu'elle s'applique au Soleil – étudie la propagation d'**ondes** acoustiques ou **de gravité** (figure 1) à l'intérieur des étoiles, pour en déduire une information sur leur structure et leur dynamique internes. Contrairement à la Terre, le Soleil – ainsi qu'une multitude d'étoiles du même type – « vibre » en permanence sous l'effet des mouvements **convectifs** de la région extérieure. Ces mouvements, similaires à ceux observés dans de l'eau qui bout dans une casserole chauffée par le fond, évacuent l'énorme quantité d'énergie créée par les réactions centrales de **fusion thermonucléaire**.

La musique du Soleil

Les cellules convectives[1] frappent la surface du Soleil et engendrent des ondes sonores qui se propagent ensuite à l'intérieur de l'étoile, de la même manière que des chocs sur la peau d'un tambour créent des ondes dans l'instrument. Le Soleil joue donc le rôle d'une énorme caisse de résonance (figure 2).



R. A. García/CEA - Spécifique

Figure 1.
Densité de puissance spectrale du Soleil, obtenue à partir du **déplacement Doppler** mesuré par GOLF (en noir) et du bruit de fond instrumental (en rouge). Pour les ondes acoustiques (fréquence supérieure à 5.10^{-4} Hz), le spectre solaire présente un maximum autour de 3.10^{-3} Hz. La forte puissance vers les fréquences basses provient des **turbulences** associées essentiellement aux mouvements granulaires (GR), supergranulaires (SGR) et au passage des régions actives (RA).

(1) Une cellule convective correspond à une « bulle » de matière chaude (moins dense) qui monte, puis se refroidit et donc redescend, pour se réchauffer et remonter.

(2) Une octave correspond à un doublement de fréquence.

La zone de transition entre les **régions radiative** et convective joue aussi un rôle important. C'est en effet une zone très **turbulente**, siège de cisaillements transverses. Cette zone stocke et amplifie la **composante toroïdale** du champ magnétique solaire. Ce dernier crée ainsi des boucles dont certaines s'élèvent jusqu'à la surface, alors que d'autres contribuent à reformer le **champ poloïdal**. Par ailleurs la zone équatoriale tourne plus vite que les pôles – la différence, d'environ 30 %, est visible à la surface de l'astre. Cette différence de rotation se propage dans toute l'épaisseur de la région convective, et contribue à la composante toroïdale du champ magnétique. La région radiative, elle, semble tourner quasiment de façon rigide : elle tourne « en bloc ». Son profil de rotation est de mieux en mieux établi. Par contre les premières observations des **modes de gravité** semblent montrer que le cœur nucléaire de l'étoile tourne plus vite ! Ceci pourrait représenter un vestige de la formation du système solaire. En effet, le jeune Soleil tournait sans doute très vite lorsqu'il s'est découplé du disque gazeux (reste de la nébuleuse initiale) qui l'entourait. Au cours de cette phase, le Soleil a pu être très actif et un fort champ magnétique s'est alors créé dans la région radiative. Or sa diffusion est très lente : quelques milliards d'années. Ce champ fossile ainsi que les ondes internes générées par la convection peuvent influencer le magnétisme sur des temps plus longs que le cycle de 11 ans. Cette histoire de l'interaction magnétique du Soleil avec la Terre reste encore à écrire.

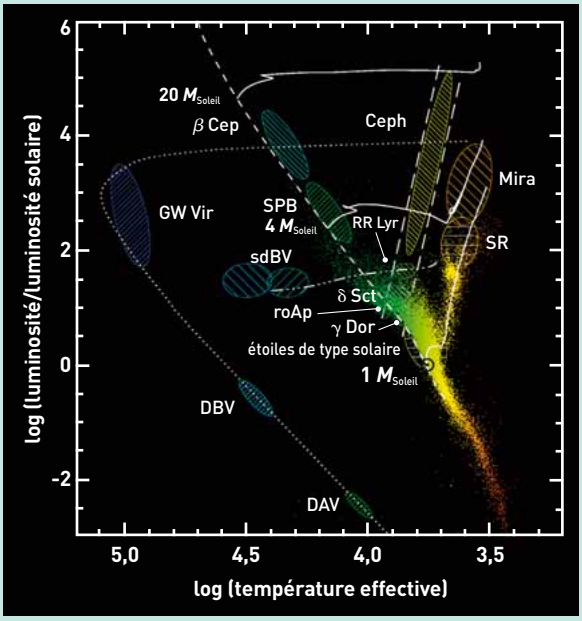
> Sylvaine Turck-Chièze
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

POUR EN SAVOIR PLUS

Clefs CEA, N° 49, Printemps 2004, Le Soleil et la Terre.
S. Turck-Chièze, R. A. García, S. Couvidat *et al.*, *Astrophysical Journal*, vol. 604, p. 455, 2004.
R. A. García, S. Turck-Chièze, S. J. Jimenez-Reyes *et al.*, *Science*, numéro 316, p. 1537, 2007.
A. S. Brun et L. Jouve, *IAU Symposium* 247, p. 33, 2008.

Dans tout instrument de musique, le son produit est d'autant plus grave que la caisse de résonance est de dimensions importantes : que l'on songe à une contrebasse et un violon, par exemple. Le Soleil ayant un volume un million trois cent mille fois supérieur à celui de la Terre, on comprend instinctivement que ses ondes acoustiques auront des fréquences très basses. Et de fait, le Soleil produit des ondes sonores décalées de 17 octaves[2] par rapport au « La naturel », qui vibre à 440 **Hz**. La fréquence des ondes solaires est centrée autour de 0,003 Hz, ce qui correspond à une période de cinq minutes.

Bien que récente, l'héliosismologie a déjà apporté une ample moisson de connaissances sur la globalité de notre étoile : profondeur de la base de la **zone convective**, abondance de l'**hélium** en surface, profil de densité, profil de rotation interne, diffusion des **éléments**... (voir *Les enseignements du Soleil*, p. 10 et *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90). Actuellement se développe une sismologie locale, qui s'intéresse aux phénomènes dynamiques de « courte » durée dans des régions proches de la surface. Les champs de vitesse et de température du **plasma** solaire sous la surface révèlent, par exemple, la structure sous-jacente des **taches solaires**. Avec le lancement du satellite franco-européen CoRoT (Convection, Rotation et Transits planétaires – **Cnes**, **ESA**), le 27 décembre 2006, l'astérosismologie est en plein essor. CoRoT a déjà observé des centaines d'étoiles de **types spectraux** bien différents, à divers stades de leur évolution. Autant de données qui affineront la théorie de l'évolution dynamique des étoiles (voir *L'origine des éléments lourds*, p. 22).



D'après J. Christensen-Dalsgaard et L. P. Rasmussen

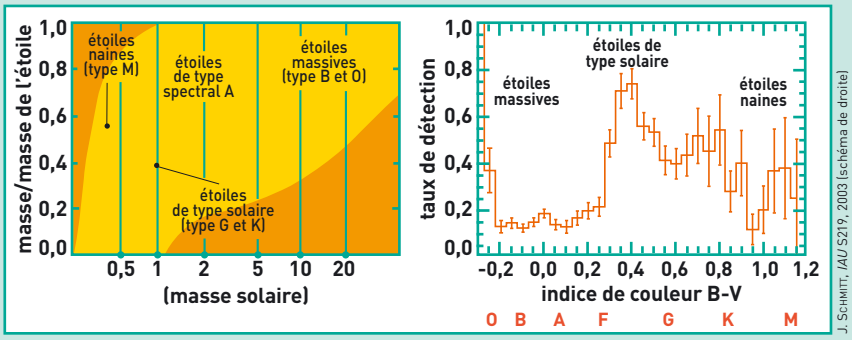
- β Cep : étoiles variables de type Beta Cephei
- SPB : étoiles faiblement variables de type B
- RR Lyr : étoiles variables de type RR Lyrae
- δ Sct : étoiles variables de type delta Scuti
- γ Dor : étoiles variables de type gamma Doradus
- roAp : étoiles de type Ap (chimiquement particulières) rapidement variables
- Ceph : **céphéides** classiques
- Mira : étoiles variables de type Mira
- SR : **variables semi-régulières**
- sdBV : étoiles sous-naines variables
- GW Vir : étoiles de type GW Virginis
- DBV : naines blanches variables de type spectral DB
- DAV : naines blanches variables de type spectral DA

Figure 2.
Diagramme de Hertzsprung-Russell, montrant la relation entre la **température effective** et la **luminosité** des étoiles, où sont indiquées les principales familles d'étoiles pulsantes dans les bandes d'instabilité. Les lignes continues correspondent à des chemins d'évolution pour des étoiles de différentes masses solaires (1, 4 et 20 masses solaires de bas en haut). Sont également représentées les étoiles dans la **séquence principale d'âge zéro** (– – – –), les étoiles dans la branche horizontale (–···–···) et la séquence de refroidissement des **naines blanches** (·····).

> Rafael A. García
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles
(CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Du Soleil aux étoiles

Le **Soleil** est une **étoile** parmi des centaines de milliards d'autres dans la **Voie lactée**. Le nombre d'étoiles de type solaire (**type spectral** G) est évalué à trois milliards, dont un milliard du sous-type G2V, qui est précisément celui du Soleil, situées sur la **séquence principale** du **diagramme de Hertzsprung-Russell**. La température de surface de ces astres est comprise entre 5 700 et 5 800 **K**. La population stellaire est en fait très diverse, et chaque type d'étoile est doté d'une structure interne et de propriétés dynamiques propres. Les astres massifs (plus de deux fois la **masse solaire**) ont un cœur nucléaire **convectif** et une enveloppe **radiative**. Les étoiles de type solaire possèdent au contraire une enveloppe convective **turbulente** et un intérieur radiatif. Enfin les étoiles de faible masse se caractérisent par des zones convectives très profondes, qui peuvent même représenter la totalité de l'astre (figure 1 gauche). Il en résulte des comportements dynamiques, des régimes de rotations et des caractéristiques magnétiques fort différents.



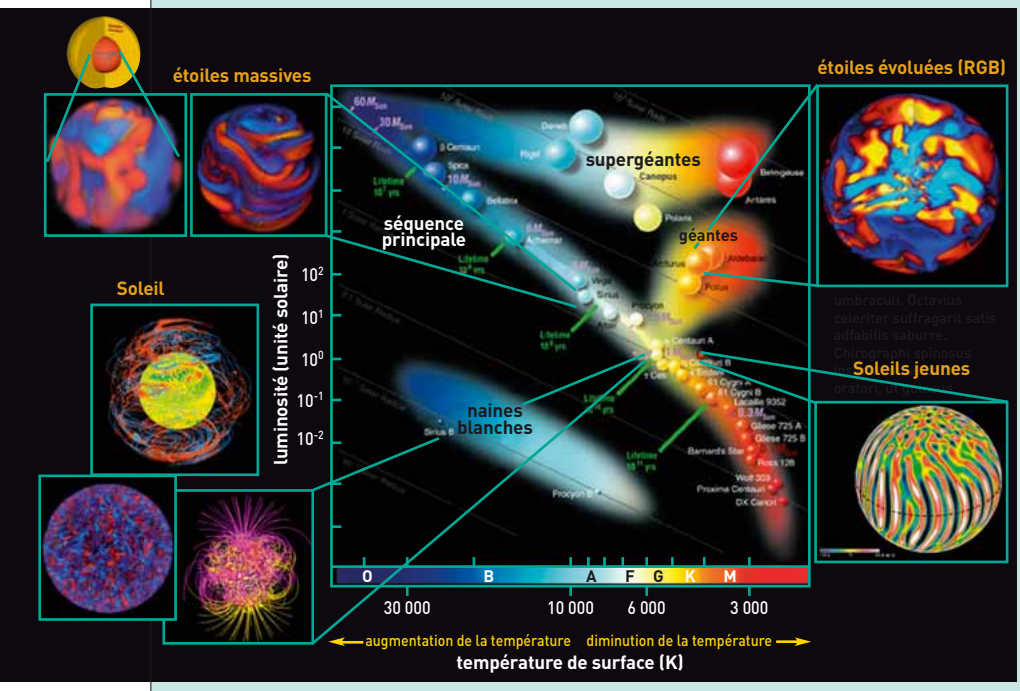
J. Schmitt, IAU S219, 2003 (schéma de droite)

Figure 1.
À gauche, distribution spatiale et en masse des zones convectives en fonction de la masse de l'étoile (cœur convectif pour les massives, enveloppe pour les petites masses). La transition entre une convection principalement à la surface ou dans le centre des étoiles se situe vers 1,3 masse solaire. À droite, taux de détection en rayonnement X d'une activité magnétique dans les étoiles. Une quasi-absence de rayonnement, donc de champ, est observée pour les étoiles de type A et B possédant un cœur convectif. Il convient de noter que l'orientation sur l'abscisse va des naines aux massives (type M jusqu'à O) dans le schéma de gauche et inversement, ce qui est plus classique, dans le schéma de droite.

À chaque étoile son activité

Depuis la fin des années 1970, la rotation et le magnétisme de plusieurs centaines d'étoiles ont été étudiés. Il en ressort que les astres pourvus d'une zone convective externe – à l'instar du Soleil – sont magnétiquement actifs et possèdent en général une **couronne** chaude émettant des **rayons X**, ce qui est un bon indicateur d'activité (figure 1 droite). Le **champ magnétique** des étoiles de type solaire présente souvent des variations cycliques, d'une période allant de 7 à 25 ans (le demi-cycle du Soleil dure 11 ans). Il existe une corrélation entre le taux de rotation et l'activité, les étoiles tournant rapidement étant souvent très actives, avec un champ magnétique principalement horizontal (**toroïdal**). Cette activité atteint un plateau pour les très forts taux de rotation, à des vitesses de 35 km/s, 10 km/s et 3 km/s, respectivement, pour les étoiles de type G (le Soleil tourne à 2 km/s), K et M. Le mécanisme de **dynamo** explique cette corrélation entre rotation et champ magnétique. Ce dernier dépend en effet des écoulements (courants, cisaillements, turbulences) qui se produisent dans la zone convective. Des **simulations numériques** effectuées au CEA ont mis en évidence les processus physiques à l'origine de l'effet dynamo et de ces écoulements à grande échelle, ainsi que la variation de ces processus physiques en fonction du taux de rotation de l'étoile (figure 2).

En revanche, l'immense majorité (90 %) des étoiles massives ne possède pas de champ magnétique ni de couronne chaude. Les étoiles de type A et B, en particulier, ont une activité très faible (figure 1 droite). Toutefois, lorsqu'elles sont dotées d'un champ magnétique, celui-ci est souvent très intense (plusieurs milliers de **gauss**), et semble oblique par rapport à l'axe de rotation. Il s'agit probablement d'un champ fossile datant de la formation de l'étoile, car le temps de **diffusion ohmique** des champs magnétiques stellaires est très long. Le cœur convectif de ces astres constitue certes une dynamo très efficace pouvant créer un champ de plusieurs millions de gauss, comme l'ont montré des simulations numériques (figure 2), mais ces champs n'émergent pas, arrêtés par l'enveloppe radiative très étendue.



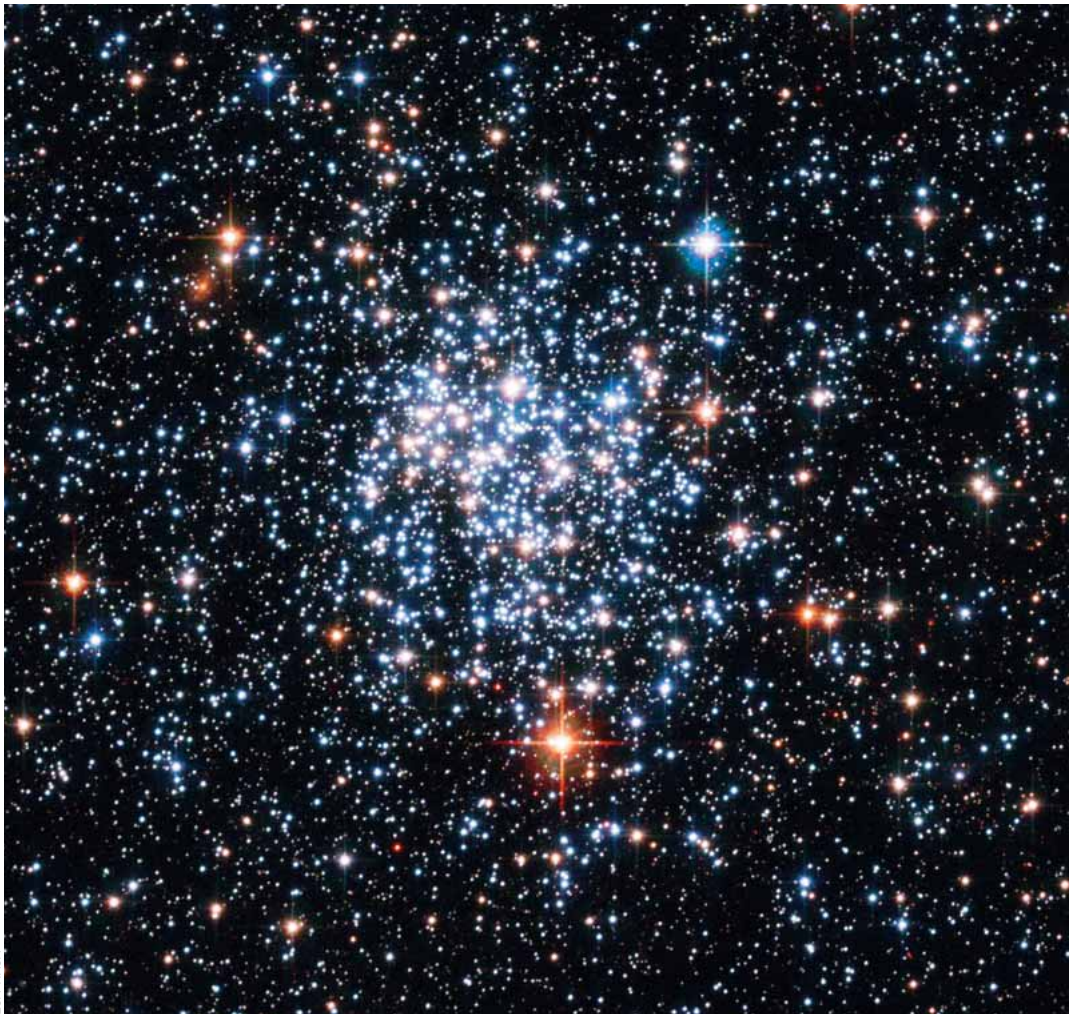
Brun et al. 2002, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, Ballot et al. 2007, Browning et al. 2004, 2006, Jouve & Brun 2007 a, b, Zahn, Brun & Mathis 2007, Brown et al. 2007

Figure 2.
Simulations numériques tridimensionnelles de la **magnétohydrodynamique** de divers types d'étoiles repérées sur le diagramme de Hertzsprung-Russell, effectuées dans le cadre du projet européen STARS2 (www.stars2.eu). RGB signifie branche des **géantes rouges**.

> Allan Sacha Brun
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Voyage dans les nurseries stellaires

Toute la vie d'une étoile est déterminée par sa masse. C'est pourquoi les astrophysiciens s'intéressent maintenant aux moments de la naissance des astres, recherchant ce qui définit leur masse. De nouveaux instruments d'observation, comme le télescope spatial Herschel, vont participer à cette étude démographique.



ESA-NASA

Amas d'étoiles NGC 265 dans le Petit Nuage de Magellan, une galaxie proche de la nôtre. Les étoiles ne naissent pas isolées mais en groupes au sein d'un grand nuage de poussière et de gaz. La lumière des amas d'étoiles est généralement dominée par les étoiles massives bleues, extrêmement lumineuses, mais ayant une vie courte. L'âge d'un amas peut alors être estimé en recensant sa population d'étoiles bleues, jaunes ou rouges.

À notre échelle, les **étoiles** paraissent inaccessibles et éternelles. Et pourtant elles naissent, vivent et meurent. Chacune des centaines de milliards d'étoiles qui composent une **galaxie** est en effet une « simple » boule de gaz – principalement de l'**hydrogène** – où se produisent et s'entretiennent des réactions de **fusion thermonucléaire**, accompagnées d'un dégagement de chaleur et de lumière. Plus une **étoile** est grosse ou **massive**, plus elle a de **combustible**, donc plus elle **brille**, plus elle fabrique des **éléments lourds** comme de l'oxygène, du carbone ou du fer… et plus vite elle épuise ses réserves (voir *L'origine des éléments lourds*, p. 22). Les plus massives – de 10 à 100 fois la **masse du Soleil** – sont très chaudes (de 10 000 à 30 000 **K** en surface) et émettent essentiellement des **ultraviolets**. Elles nous apparaissent bleues et disparaissent après quelques dizaines de millions d'années. À l'opposé, les petites étoiles brillent peu, nous apparaissent rouges et mènent une vie tranquille. Ne dispersant que très peu d'énergie dans l'espace puisque leur température ne dépasse pas les 1 300 K en surface, elles peuvent exister durant des milliards d'années. Le Soleil, étoile moyenne s'il en est, devrait vivre environ 10 milliards d'années. Le lecteur l'a compris : c'est la masse d'une étoile qui dicte son destin. Elle détermine sa durée de vie, son intensité lumineuse ou sa capacité à créer des éléments lourds. Elle préside aussi à sa mort, par exemple sous forme de **supernova**, et donc à l'impact de cette disparition sur l'*écologie galactique* (dispersion de matière recyclable dans le **milieu interstellaire**).

La naissance des étoiles

Le destin d'une étoile serait ainsi scellé dès sa naissance. Or cet épisode est encore mal connu. Comment le milieu interstellaire, ce gaz raréfié contenant quelques centaines d'**atomes** et **molécules** par litre, peut-il engendrer des objets aussi massifs ? Comment certaines parties d'un nuage

NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (AURA/STScI)

Région de formation d'étoiles N11B du Grand Nuage de Magellan, observée par le télescope spatial Hubble. Les étoiles naissent dans les zones noires et opaques des nuages moléculaires. Cette image montre un amas d'étoiles dans le milieu interstellaire et de nouvelles étoiles dont la lumière s'échappe des fragments rougeâtres et noirâtres du nuage.

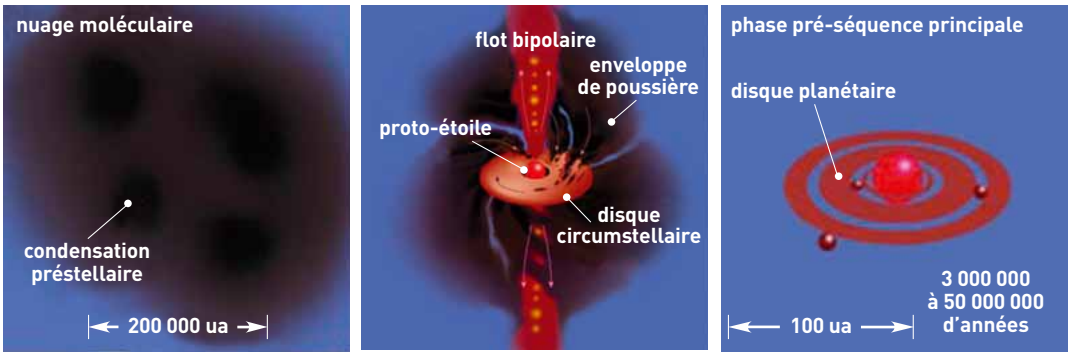
moléculaire se transforment-elles en véritables « populations » d'étoiles ? Quelles sont les grandes étapes de la gestation des étoiles ? Pourquoi les petites étoiles comme les **naines rouges** et les étoiles de type solaire sont-elles toujours plus nombreuses que les étoiles massives dans une population donnée ?

Les étoiles ne naissent pas dans le milieu interstellaire à proprement parler. Les « pouponnières d'étoiles » sont en fait d'immenses – de l'ordre d'une centaine **d'années-lumière** de diamètre – nuages moléculaires contenant de l'alcool, de l'ammoniaque, de l'eau, du monoxyde de carbone et surtout de l'hydrogène sous forme moléculaire (H_2). Comprenant en moyenne mille molécules par cm^3 (un dé à coudre), soit un million par litre, ces nuages sont beaucoup plus denses que le milieu environnant[1]. Malgré un nombre limité de molécules par unité de volume, le réservoir de matière est en fait très important sur ces immenses volumes. Là se forment des milliers d'étoiles, souvent en « **amas** », qui sont des ensembles d'astres nés dans la même région et liés par **gravitation**. Les observateurs du ciel nocturne connaissent par exemple l'amas des Pléiades, situé dans la constellation du Taureau.

Histoire en trois épisodes

La mutation d'un nuage moléculaire en un amas d'étoiles se déroule en trois grandes phases. Durant la première, dite « préstellaire », le nuage initial se fragmente en morceaux sous l'influence de mouvements **turbulents** à grande échelle. Les fragments se condensent ensuite sous l'effet de leur propre **gravité**. La pression interne du gaz, d'origine thermique, turbulente et magnétique, ralentit toutefois cette contraction, et maintient tout d'abord un certain équilibre. À un certain point, pour des raisons encore mal comprises, l'équilibre se rompt soudain et chaque fragment de nuage préstellaire s'effondre rapidement sur lui-même sous l'action de son propre poids. Les astrophysiciens ne savent pas encore si cet effondrement résulte de forces extérieures ou de la dissipation des résistances internes (turbulences ou magnétisme). Quoi qu'il en soit, un noyau central de taille et de densité stellaires se forme alors. Cela marque le début de la deuxième phase, dite « proto-stellaire » puisque ce noyau constitue l'embryon de la future étoile. Il grossit alors en dévorant une grande partie de la matière (gaz, poussière) du nuage condensé qui l'enveloppe. Lorsque toute cette matière est consommée, la phase proto-stellaire s'achève. L'étoile entre dans la troisième phase de sa naissance, dite « pré-séquence principale », en se contractant sous l'effet de son propre poids. Sa température interne augmente jusqu'à amorcer les réactions nucléaires de fusion de l'hydrogène en **hélium**. Une étoile de la **séquence principale**, comme notre Soleil, est née (figure 1). Si ce scénario en trois phases est relativement bien établi pour les étoiles de taille moyenne, la formation des astres de masse beaucoup plus petite, ou beaucoup plus grande, reste un sujet de débat. Les astrophysiciens ne savent pas encore s'ils se forment à partir de condensations préstellaires individuelles.

(1) Une densité toute relative cependant puisque, sur Terre, elle correspond au vide créé en laboratoire !



D'après T. Greene

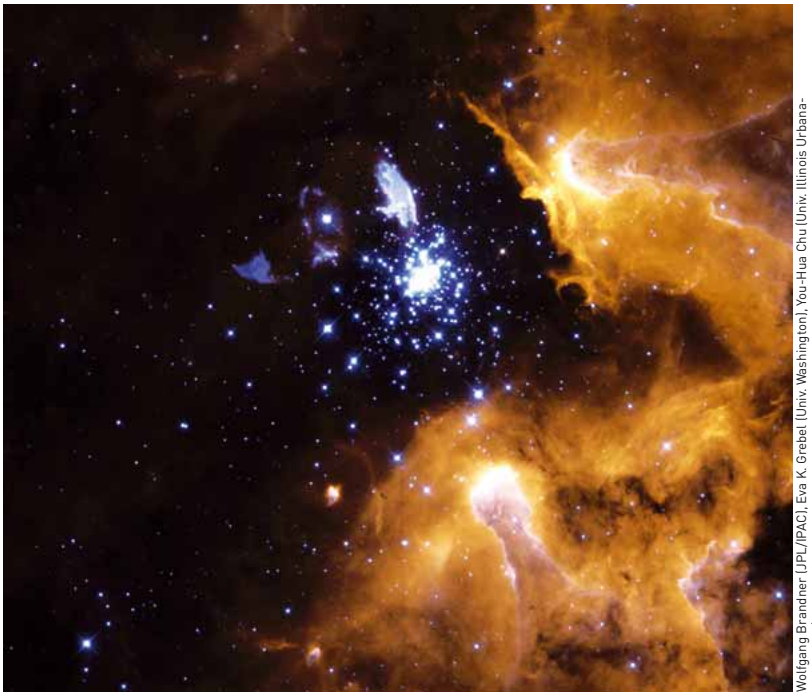
Figure 1. Des considérations théoriques et des observations indiquent que le processus de fabrication d'une étoile de type solaire comprend au moins trois phases distinctes : la phase préstellaire (à gauche), la phase proto-stellaire (au milieu) et la phase pré-séquence principale (à droite). 1 **ua** (unité astronomique) = 150 millions de km.

L'inné et l'acquis

La très grande majorité des étoiles naissent en grandes fratries, les amas. Les observations d'amas jeunes montrent que les astres massifs (8 fois ou plus la masse solaire) y sont minoritaires. Il en va de même pour les étoiles très petites (un dixième de la masse solaire ou moins). La majorité des étoiles nouveau-nées ont donc une masse de l'ordre de celle du Soleil. Cette répartition des masses au sein d'un amas, que les astrophysiciens appellent « fonction de masse initiale », est-elle universelle ? Autrement dit, les populations d'étoiles ont-elles toutes la même composition, où qu'on les observe dans l'Univers ? La question est aujourd'hui posée.

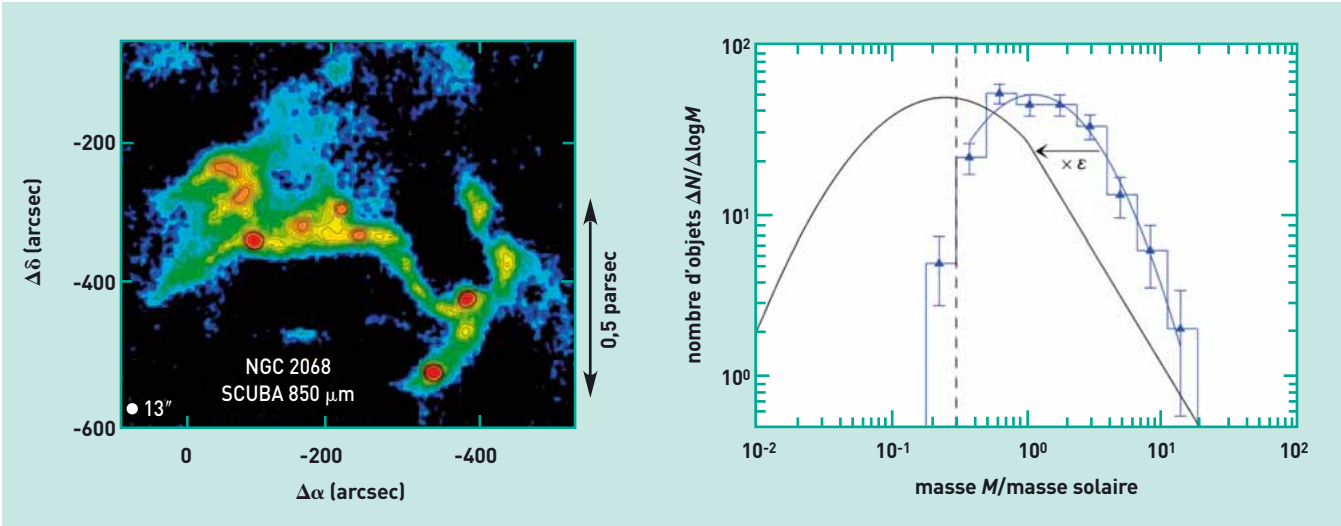
Une autre grande question, portant sur les étoiles, taraude les scientifiques. Quand et comment se détermine la masse d'un astre particulier au sein d'un amas ? Pour y répondre, les astrophysiciens du CEA mènent une véritable étude démographique des populations d'étoiles, de la gestation à la naissance. Ils testent par les observations deux **modèles**, reposant sur des calculs analytiques et des **simulations numériques**, pour expliquer la répartition des masses dans un amas. Dans le premier, la masse de chaque étoile est innée. Les nuages moléculaires se fragmentent en un certain nombre de condensations préstellaires qui se libèrent de leur environnement turbulent. Elles s'effondrent sur elles-mêmes pour donner chacune naissance à une proto-étoile. La masse de chaque étoile formée dépend donc directement de celle de la condensation préstellaire qui l'a engendrée. Dans ce cas, la répartition des masses stellaires dans la population résulte du processus de fragmentation du nuage au stade préstellaire. La masse des étoiles est donc déterminée avant l'effondrement des condensations individuelles (figure 2).

Dans le deuxième modèle, la masse de l'étoile est acquise, et quasiment indépendante de celle du cœur préstellaire initial produit par fragmentation. Chaque proto-étoile issue d'une condensation préstellaire se déplace à l'intérieur du nuage parent et accumule progressivement de la masse en « balayant » et en attirant une plus ou moins grande quantité de la matière qu'elle traverse. Or plus une étoile est grosse, plus elle attire de matière au détriment des plus petits objets. Dans ces conditions, des objets de tailles initialement comparables – bien que pas strictement identiques – vont peu à peu se différencier. Les astronomes appellent ce phénomène l'*accrétion compétitive*. Dans ce modèle, la répartition des individus en fonction de leur masse n'est déterminée qu'après le stade préstellaire, c'est-à-dire après l'effondrement des condensations en proto-étoiles.



Wolfgang Brandner (JPL/IPAC), Eva K. Grebel (Univ. Washington), You-Hua Chu (Univ. Illinois Urbana-Champaign), and NASA

La nébuleuse NGC 3603 observée par le télescope spatial Hubble. Un amas de jeunes étoiles massives (en bleu) brille dans l'ultraviolet à 20 000 années-lumière. Il s'est extrait du nuage voisin de gaz moléculaire et de poussière.

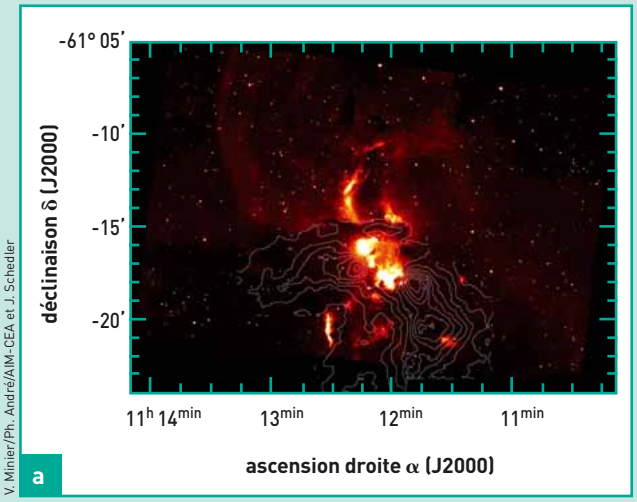


F. Motte/Ph. André/AIM-CEA

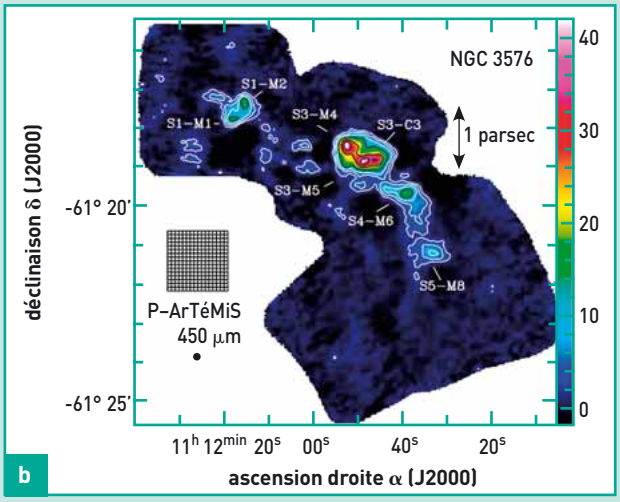
Figure 2.
À gauche, image des condensations préstellaires au sein de NGC 2068, une région de formation d'étoiles dans la constellation d'Orion. Les observations ont été réalisées avec la caméra de bolomètres SCUBA – installée sur le *James Clerk Maxwell Telescope* situé à Hawaii – aux longueurs d'onde submillimétriques à 850 microns. Chaque fragment pourrait donner naissance à une ou deux étoiles. 1 parsec (pc) = 206 265 **ua**.
À droite, nombre de condensations préstellaires en fonction de leur masse. La distribution de masse des condensations (en bleu) reproduit globalement la forme de la fonction de masse initiale estimée aujourd'hui pour les étoiles de notre Galaxie (en noir) avec un décalage d'un facteur $\varepsilon \approx 25\,\%$ vers les grandes masses. Cela signifie que toute la masse contenue dans une condensation n'est pas totalement transformée en masse stellaire. Ce résultat suggère que les masses des étoiles de type solaire sont déterminées principalement par le processus de fragmentation du nuage moléculaire au stade préstellaire.

Lumière sur les cocons d'étoiles

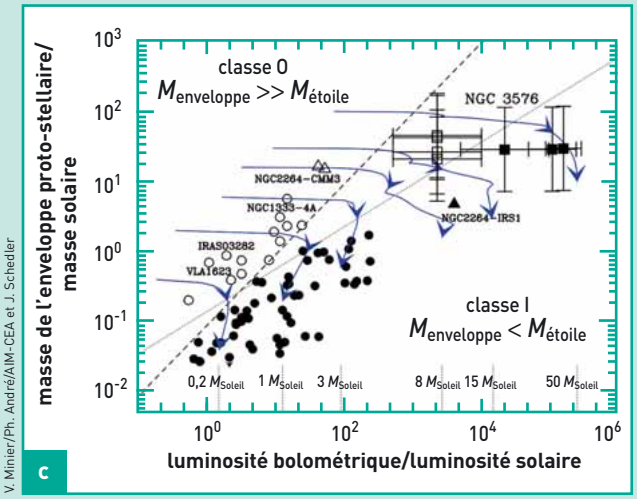
L'approche de l'astronome consiste à trouver, par l'observation, une séquence d'objets intermédiaires entre la fragmentation du nuage **moléculaire** et un type de jeune **étoile** afin de reconstituer le film de sa fabrication. Les scientifiques sondent les nuages moléculaires à la recherche des condensations glacées dans lesquelles naissent les étoiles, des **naines brunes** aux **étoiles massives**. Ces astres en devenir, très froids, émettent de l'énergie principalement dans le domaine **infrarouge submillimétrique** de la lumière. Plus la condensation est froide, plus sa couleur, et donc son énergie, se décale vers l'infrarouge et les longueurs d'onde submillimétriques (0,1 à 1 mm). En mesurant l'énergie émise par ces fragments à différentes longueurs d'onde, il est possible de déterminer leur **luminosité**, c'est-à-dire leur puissance lumineuse. Cette méthode est illustrée par les figures ci-dessous, qui concernent une région de **notre Galaxie** dénommée NGC 3576. C'est un réservoir de gaz dans lequel se forment des étoiles.



V. Minier/Ph. André/AIM-CEA et J. Schedler



V. Minier/Ph. André/AIM-CEA et J. Schedler



V. Minier/Ph. André/AIM-CEA et J. Schedler

Figure.
a. Le gaz froid et les cocons des embryons d'étoiles sont des zones totalement **opaques**, apparaissant comme des régions très sombres dans la **Voie lactée**. L'observation de l'émission du monoxyde de carbone (CO) montre que ces bandes sombres sont les plus denses en gaz (contour blanc traçant la distribution de rayonnement émis par le CO).

b. Pour « percer » ces condensations préstellaires, les astronomes réalisent des observations en infrarouge submillimétrique, à la longueur d'onde de 450 **microns** sur cette image prise par la caméra P-ArTéMiS sur le télescope APEX. Le télescope recueille la lumière émise par les grains de poussière, qui ne représentent qu'un pour cent de la masse totale du gaz avec lequel ils cohabitent. Ils **absorbent** l'intensité lumineuse émise autour d'eux et la restituent dans l'infrarouge, et pour les plus froids dans l'infrarouge submillimétrique. La mesure de leur énergie a révélé huit fragments à l'intérieur de NGC 3576.

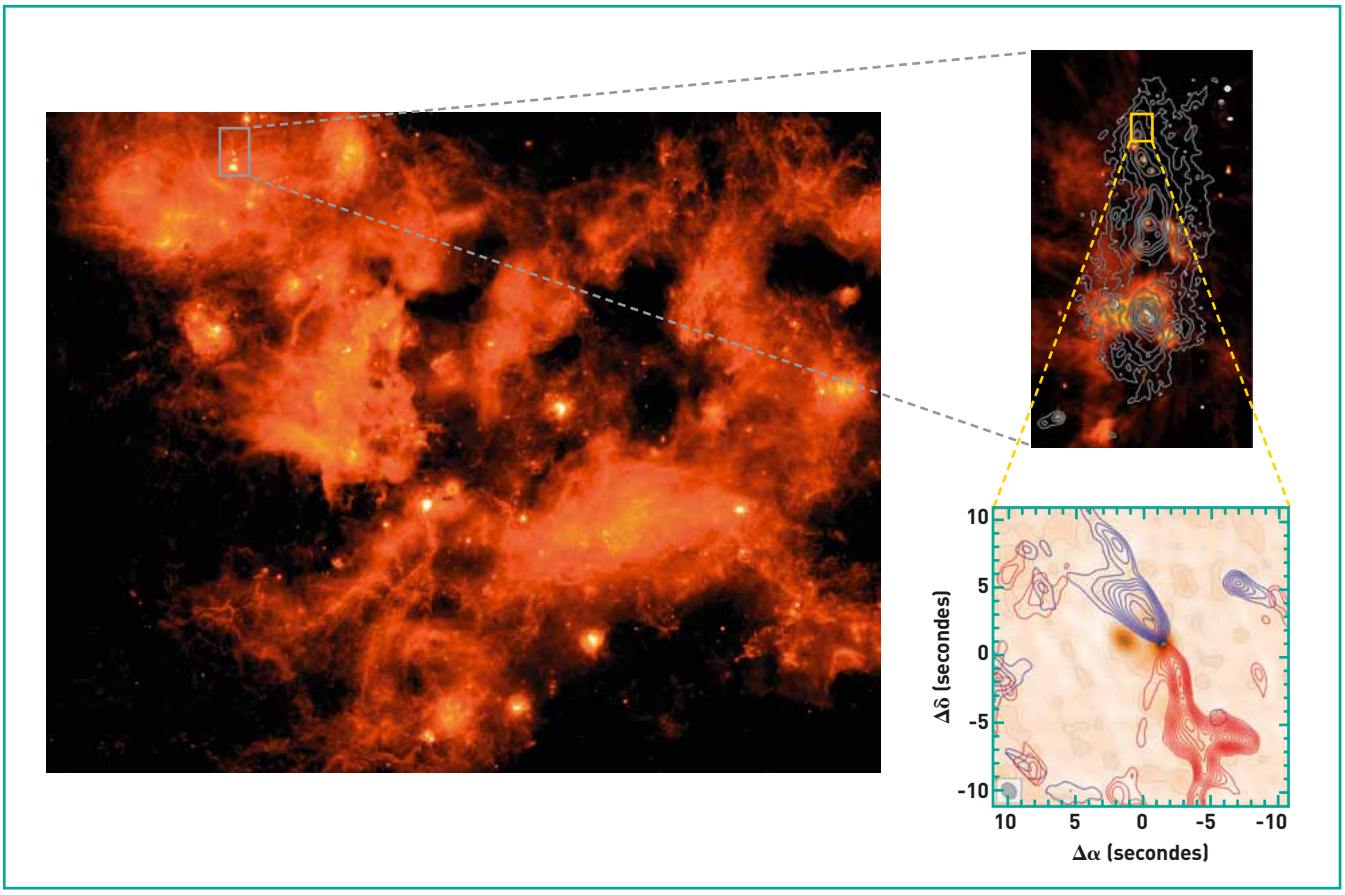
c. Ce diagramme représente la masse du cocon de poussière d'une proto-étoile et sa luminosité, qui déterminent dans quelle phase précoce (classe 0 ou classe I) se trouvent les proto-étoiles de NGC 3576. La classe I est une phase plus évoluée que la classe 0. À partir de modèles théoriques, il est possible de prédire la masse finale du futur astre, soit entre 8 et 50 fois la masse du Soleil pour ces étoiles.

Observer les étoiles naissantes

Pour trancher entre ces deux scénarios, et introduire les bonnes conditions initiales dans les simulations numériques, la meilleure façon reste d'observer directement des populations d'étoiles en phase précoce. Les astronomes recherchent donc des objets intermédiaires représentant toutes les étapes de la séquence allant du nuage moléculaire aux très jeunes étoiles, et ce pour tous les types de masse. Ils réalisent l'étude quantitative de ces populations en déterminant leurs caractéristiques comme la **luminosité**, la température, la densité et la masse des cocons. Toutes données qui nourriront les modèles des astrophysiciens (encadré). Cependant les condensations préstellaires et les plus jeunes proto-étoiles sont des objets trop froids pour émettre aux longueurs d'onde **visibles**, et les observer requiert des instruments à haute **résolution angulaire** dans les domaines **infrarouge** et **submillimétrique** (figure 3). Plusieurs grands télescopes sont très attendus au cours des prochaines années pour approfondir et peut-être révolutionner les connaissances actuelles sur les premières étapes de la formation stellaire.

L'observatoire spatial Herschel[2] (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90), une mission scientifique de l'**ESA**, mesurera, pour la première fois, la quantité d'énergie émise par les cocons stellaires.

(2) Voir http://herschel.cea.fr



F. Motte/N. Schneider/AIM-CEA

Figure 3.
À gauche, image en infrarouge d'un ensemble de nuages moléculaires formant des étoiles massives dans la constellation du Cygne. Le rayonnement infrarouge est émis par les grains de poussière. En haut à droite, zoom sur une zone du nuage dans laquelle des condensations proto-stellaires sont observées grâce au rayonnement émis par les poussières très froides aux longueurs d'onde millimétriques. En bas à droite, une étoile massive naît à l'intérieur d'une condensation proto-stellaire en **accrétant** de la matière et en rejetant une partie à travers des flots moléculaires (contours en rouge et en bleu). Ces études exigent de combiner des cartographies de grandes zones avec des observations fines.

Herschel, lancé le 14 mai 2009 par une fusée Ariane 5, sondera les nuages moléculaires à la recherche des condensations glacées dans lesquelles naissent les étoiles, des **naines brunes** aux étoiles massives. Il part donc à la recherche des fragments de nuages moléculaires susceptibles de s'effondrer. À partir de la mesure de leur luminosité, les astronomes déduiront la répartition des masses des fragments préstellaires. Ils construiront ainsi des courbes démographiques représentant la répartition des condensations préstellaires et des embryons d'étoiles. En comparant ces courbes à celles constatées dans les populations d'étoiles matures de **notre Galaxie**, les astronomes pourront conclure sur l'origine de la masse des astres : innée (si les courbes sont comparables) ou acquise (si elles sont différentes). Herschel travaille dans une « gamme » comprise entre un centième et une dizaine de masses solaires. Le télescope APEX (*Atacama Pathfinder Experiment*) situé au Chili, et qui sera équipé en 2011 de la caméra de **bolomètres** ArTéMiS du CEA/Irfu (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90), prêtera main-forte à Herschel. En effet, avec l'augmentation de la taille des télescopes, et donc de la finesse des observations, les scientifiques peuvent sonder des condensations plus lointaines dans lesquelles naissent les étoiles massives.

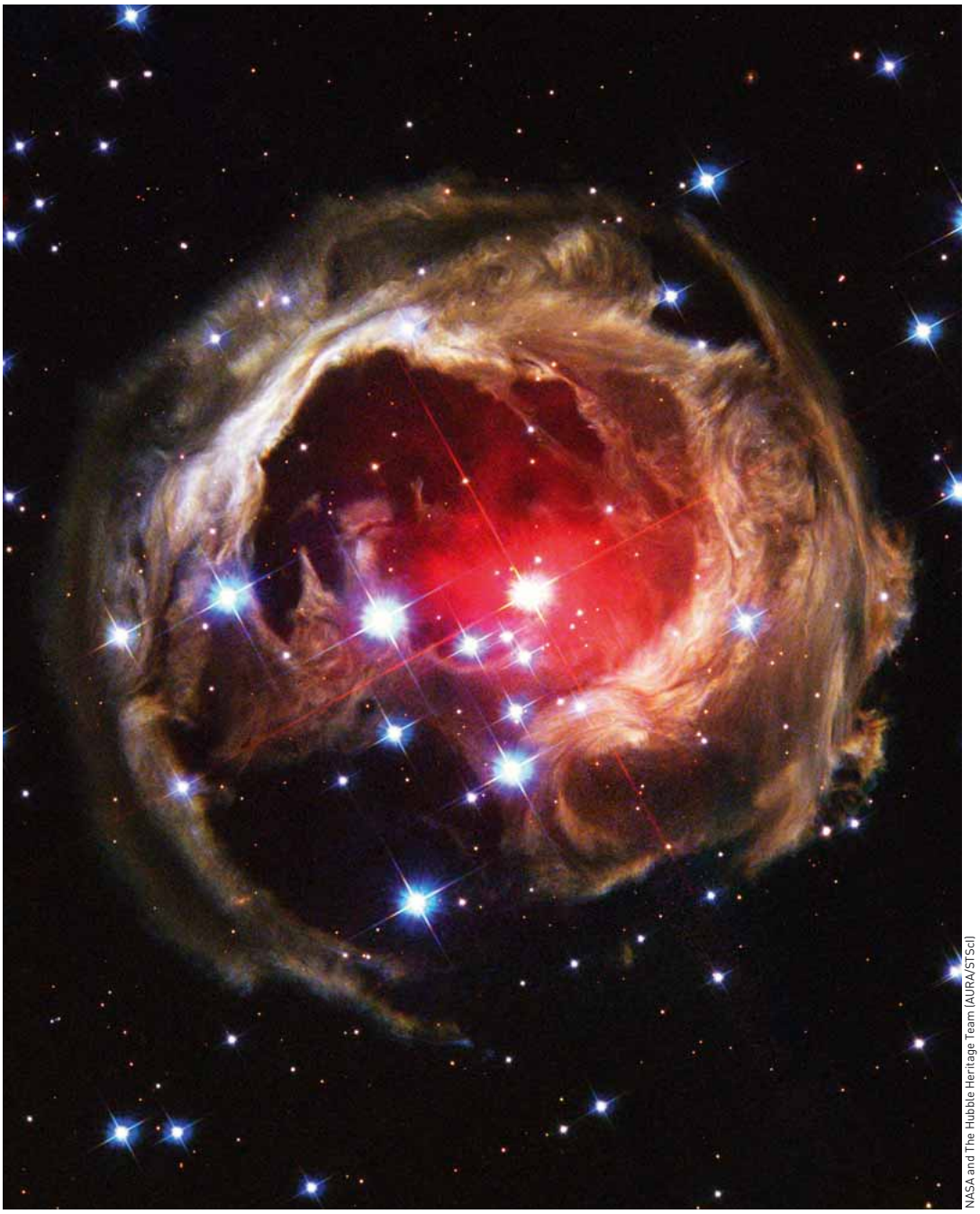
ESO

Le télescope APEX, une antenne parabolique de 12 mètres de diamètre placée à 5 100 mètres d'altitude sur le haut plateau de Chajnantor dans le désert d'Atacama au Chili, accueillera la caméra de bolomètres ArTéMiS du CEA/Irfu en 2011. Des observations concluantes ont déjà été réalisées avec le prototype de cette caméra, P-ArTéMiS, à la longueur d'onde de 450 microns. Ce télescope est géré par un consortium composé du **MPIfR** en Allemagne, **OSO** en Suède et **ESO** pour l'Europe.

> **Vincent Minier, Philippe André** et **Frédérique Motte**
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

L'origine des éléments lourds

La plupart des éléments présents dans l'Univers ont été créés par synthèse nucléaire au cœur des étoiles, puis dispersés à la mort de celles-ci... avant de contribuer à la formation des générations ultérieures d'astres. L'évolution des étoiles est donc un élément clé de celle de l'Univers, à toutes les échelles.



NASA and The Hubble Heritage Team (AURA/STScI)

V838 Monocerotis supergéante rouge de la constellation de la Licorne, photographiée par le télescope spatial Hubble, est située à environ 20 000 **années-lumière**. Le 6 janvier 2002, elle a produit un éclat très intense qui a illuminé le cocon de poussière l'entourant. La compréhension de la formation des étoiles – constituants élémentaires de notre Univers – de leur évolution dynamique et de leur fin de vie est une des briques de base de l'astrophysique moderne.

Véritables réacteurs **thermonucléaires**, les **étoiles** fabriquent des **noyaux lourds** à partir des **éléments primordiaux** créés au moment du **big bang** : **hydrogène**, **hélium** et **deutérium**. Lorsque l'astre arrive en fin de vie, ces éléments enrichissent les couches externes puis le **milieu interstellaire**. Cela modifie la composition chimique des **galaxies** et donc les sites potentiels de formation des générations ultérieures d'étoiles. Pour comprendre comment ce qui était à l'origine essentiellement une boule d'hydrogène peut, à la fin de son existence, disperser des **éléments lourds** dans l'espace, il faut remonter le « film » de cette évolution. Quand une étoile a achevé sa phase de formation (voir *Voyage dans les nurseries stellaires*, p. 17), elle entre dans sa **séquence principale**, très longue période durant

laquelle la **fusion** de l'hydrogène produit au moins 99 % de l'énergie rayonnée. Durant cette phase, la **luminosité** (ou puissance rayonnée) et la **température effective** de surface changent relativement peu. Dans les étoiles de masse inférieure à 1,3 fois celle du **Soleil**, la fusion de l'hydrogène pour former de l'hélium s'effectue par interaction de **protons** (réactions p-p). Dans les astres plus massifs, à la température centrale plus élevée qui permet de franchir la **barrière coulombienne**, le processus suit le **cycle CNO** (**carbone-azote-oxygène**). Pendant toute cette séquence, les réactions nucléaires sont régulées par l'**équilibre hydrostatique** entre le gradient de la pression du gaz et la **gravitation**. Si les réactions s'emballent, l'étoile se dilate. Par contre, lorsque le **combustible** s'épuise, le cœur se contracte et sa température augmente, allumant ainsi les réactions, jusqu'à ce que l'hydrogène resté intact dans les couches supérieures puisse aussi se transformer en hélium. Cette combustion « en couche » s'accompagne de la dilatation des régions externes, qui de ce fait sont de moins en moins retenues par la **gravité**. À la fin de cette évolution, l'étoile devenue une **géante rouge** perd une partie de son enveloppe.

Comment les étoiles ensemencent l'espace

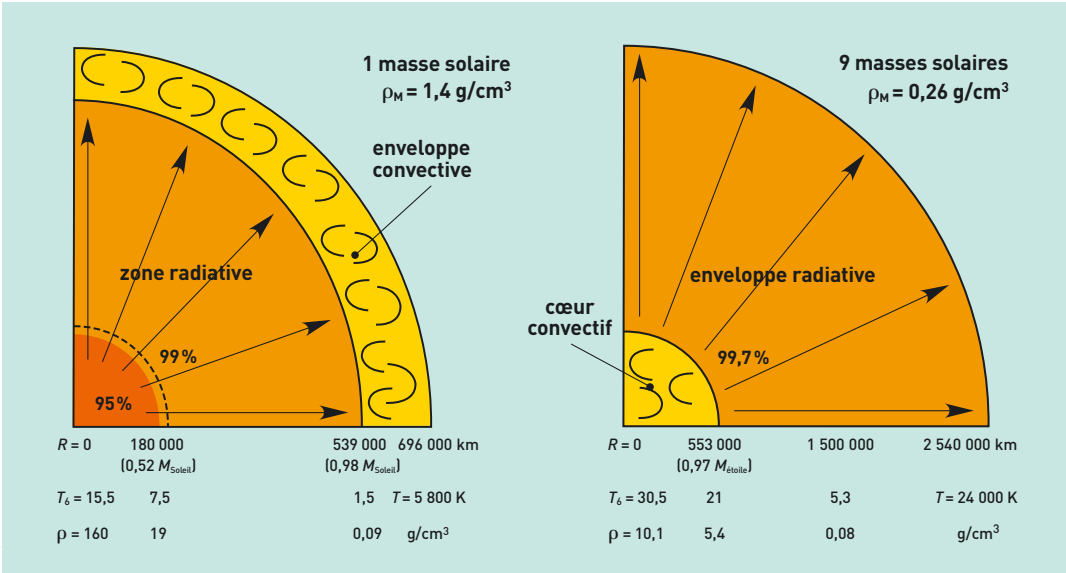
La suite de l'histoire dépend alors de la masse initiale de l'étoile. Les astres de faible masse (entre 0,07 et 0,5 fois la **masse solaire**) terminent leur vie comme des **naines blanches** formées d'hélium. Au-delà de la moitié de la masse solaire, au contraire, l'hélium fusionne pour donner du carbone et de l'oxygène. L'évolution s'accélère et l'hélium est rapidement consommé. Les astres de moins de 8 fois la masse solaire donnent ainsi naissance à des naines blanches, mais cette fois-ci composées de carbone et d'oxygène. Toutes les naines blanches sont des astres compacts dégénérés, d'une densité d'environ une tonne par centimètre cube. Ces « restes d'étoiles », de masse généralement inférieure à celle du Soleil du fait de la dispersion des couches externes, peuvent accumuler de la matière par **accrétion**. Certains atteignent alors une **masse critique**, dite **de Chandrasekhar**, et explosent en une **supernova** thermonucléaire (voir *L'explosion des supernovae*, p. 26).

Les étoiles massives (de 9 à 120 fois la masse solaire) évoluent différemment. Leur température centrale étant plus élevée, les réactions de fusion peuvent aller au-delà de la création de carbone et d'oxygène, synthétisant successivement le néon, le silicium et ainsi de suite jusqu'au fer, qui est l'élément le plus stable. L'étoile est alors à court de combustible nucléaire et elle s'effondre en libérant une quantité énorme d'énergie sous forme de **photons** et de **neutrinos**. En quelques minutes, elle devient un milliard de fois plus lumineuse : c'est l'explosion d'une supernova gravitationnelle (voir *L'explosion des supernovae*, p. 26). Les couches externes sont alors éjectées et enrichissent le milieu interstellaire en éléments lourds. Le cadavre stellaire qui en résulte est un objet extrêmement compact d'une dizaine de kilomètres de rayon, constitué de **neutrons**, d'une densité de plus d'un million de tonnes par centimètre cube, qui s'effondre en un **trou noir stellaire** lorsque sa masse dépasse trois fois celle du Soleil.

Le milieu interstellaire est donc constamment enrichi en éléments lourds en provenance d'anciennes étoiles (on dit que sa métallicité augmente), qui entreront à leur tour dans la composition des astres futurs. Cependant, si ce scénario régi par l'équilibre hydrostatique et la physique microscopique explique les grandes lignes de l'évolution des étoiles, il ne prend pas en compte les processus dynamiques internes, ni les interactions des astres avec leur environnement.

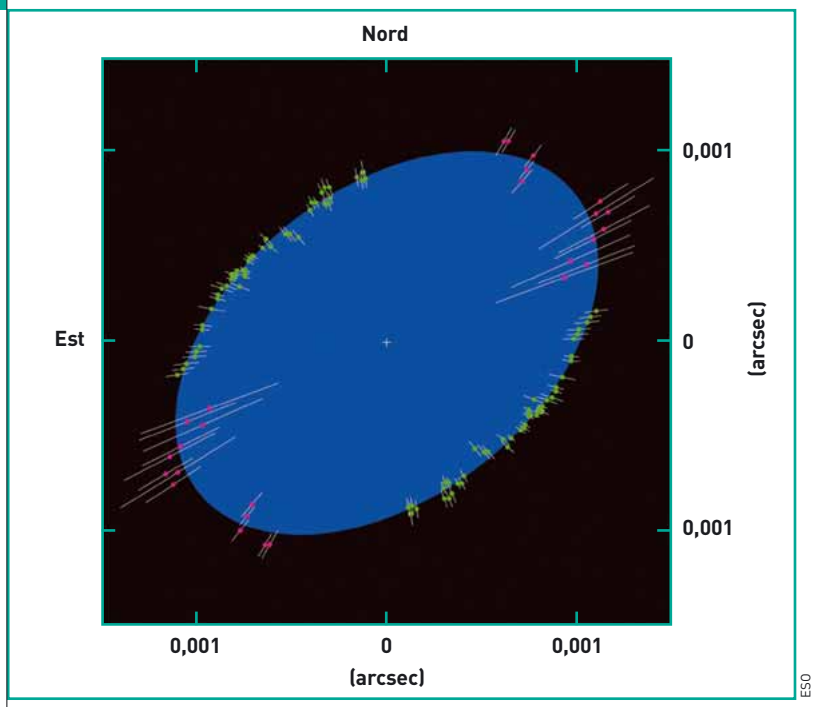
Des astres très agités

Les étoiles sont en effet des objets dynamiques en rotation, dotés d'un **champ magnétique**, où divers types d'**ondes** se manifestent (voir *Les enseignements du Soleil*, p. 10 et *Du Soleil aux étoiles*, p. 16). De plus,



(adapté de André Maeder, 2009)

Figure 1.
Structures d'une étoile de même masse que le Soleil (à gauche) et d'une étoile neuf fois plus massive (à droite). Les rayons R, les températures T (en K) ou T_6 (en millions de K) ainsi que les densités ρ sont indiqués pour le centre et les limites des régions radiatives et convectives. ρ_M représente la densité moyenne de l'étoile. Les pourcentages correspondent à la fraction de l'énergie totale produite.



ESO

Figure 2.
Achernar, une étoile de **type B** de 6,07 fois la masse solaire. Elle est très aplatie du fait de sa rotation très rapide : en surface, sa vitesse de rotation vaut 150 fois celle du Soleil.

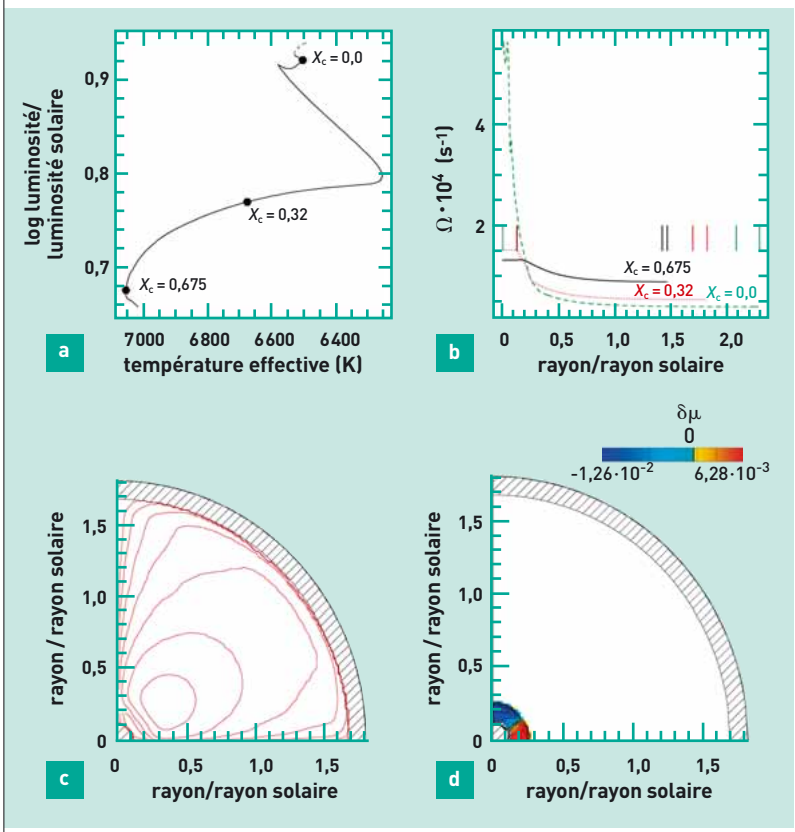


Figure 3.
Modèle dynamique d'une étoile en rotation de 1,5 fois la masse solaire. En a, chemin évolutif dans le **diagramme de Hertzsprung-Russell** ; X_c désigne la fraction de masse en hydrogène au cœur de l'étoile. En b, profil de rotation interne à trois instants de sa vie. Le rayon de l'étoile augmente au cours de son évolution. Les barres verticales indiquent les positions des zones convectives. En c, lignes tangentes aux champs de vitesse induits par la rotation différentielle dans le plan méridien de l'étoile pour $X_c = 0,32$. Les boucles tournent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre signifiant que le moment cinétique est transporté vers l'extérieur. Les zones hachurées correspondent aux régions convectives. En d, pollution chimique provoquée par la rotation pour $X_c = 0,32$. μ représente le poids moléculaire moyen qui permet de décrire le mélange des éléments dans le plasma stellaire. Dans le cas d'un plasma pur d'hydrogène ionisé, il vaut 1/2.

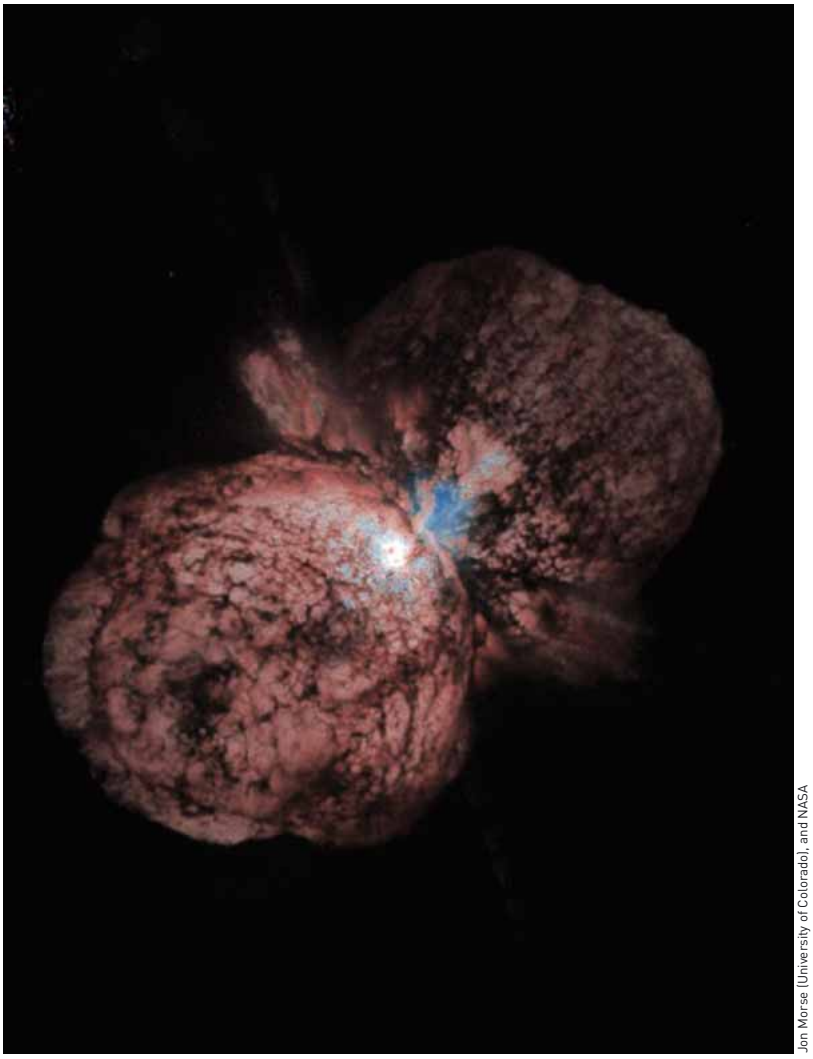
elles émettent dans l'environnement des **vents stellaires** (conduits par le magnétisme dans le cas des étoiles de type solaire et par la pression de radiation pour les étoiles massives). Durant leur phase de pré-séquence principale, elles sont couplées à des **disques d'accrétion**, et peuvent aussi interagir, par transfert de masse ou **effet de marée**, avec un astre compagnon si elles appartiennent à un **système binaire**. Décrire l'évolution stellaire en considérant tous ces phénomènes exige de prendre en compte simultanément des phénomènes physiques microscopiques et macroscopiques, dont les échelles spatiales et temporelles diffèrent de plusieurs ordres de grandeur. Par exemple, l'évolution nucléaire des étoiles se déroule durant des millions ou des milliards d'années, alors que des processus hydrodynamiques – tels que la **convection** ou les instabilités conduisant à la **turbulence** – prennent place sur des échelles de temps de l'ordre du mois, voire moins. Pour relever un tel défi, le CEA s'est fortement investi dans la **modélisation** et la **simulation** des processus **magnétohydrodynamiques** internes. Ce que l'on sait aujourd'hui des mécanismes de transport du **moment cinétique** et de la matière à l'intérieur des étoiles peut se décrire comme suit. Dans les **régions radiatives** des étoiles, l'énergie créée par les réactions nucléaires est transportée par l'interaction entre les photons et la matière. Le **plasma** stellaire est en effet peu **opaque**, et les photons sont **absorbés** et réémis des millions de fois au cours de leurs collisions avec les **atomes ionisés**. Dans les **régions convectives**, la matière chaude monte des couches profondes vers les régions supérieures où elle dépose sa chaleur avant de redescendre. Ces grands mouvements d'ensemble, dits convectifs, sont dus au fort gradient de température et au fait que la densité de la matière diminue quand sa température augmente (figure 1). Les étoiles de type solaire ont un cœur radiatif et une enveloppe convective (où le plasma est opaque du fait d'une ionisation seulement partielle des atomes), alors que la situation est inversée dans les astres massifs – de masse supérieure à 1,3 fois celle du Soleil – où les photons ne peuvent évacuer l'énergie produite près du centre (voir la figure 1 de *Du Soleil aux étoiles*, p. 16).

Une histoire complexe

Le mélange des éléments formés par **nucléosynthèse** s'effectue dans les régions radiatives, sur de très longues durées. Les mécanismes de transport entrant en jeu se répartissent en deux grandes familles selon leur échelle, microscopique ou macroscopique. Les mécanismes microscopiques comprennent le triage gravitationnel et les forces dues au rayonnement, qui influencent le déplacement de chaque particule ou atome. Les processus magnétohydrodynamiques, eux, agissent à l'échelle macroscopique.

Ainsi, les régions radiatives sont en rotation, parfois très rapide (figure 2). Celle-ci n'est ni constante ni uniforme au cours de l'évolution de l'étoile. En fait, chacune des différentes couches de l'étoile a sa propre vitesse angulaire. Cette rotation différentielle crée des champs de vitesse à grande échelle (équivalents des grandes circulations des atmosphères

planétaires) et de la turbulence associée au cisaillement (équivalente à celle observée dans l'atmosphère terrestre ou les océans). Ceux-ci transportent le moment cinétique et provoquent un mélange qui modifie la structure de l'étoile.
D'autre part, les étoiles ont vraisemblablement piégé un champ magnétique, appelé « fossile » car il remonte à l'époque de leur formation, dans leurs régions radiatives. Ce champ interagit avec les processus précédents, engendrant un transport de moment cinétique supplémentaire qui modifie le couplage entre les différentes couches de l'étoile. Qui plus est, sous l'influence opposée de la poussée d'Archimède (qui pousse la matière vers le haut) et de la gravité (qui l'attire vers le centre), les régions radiatives sont également parcourues de phénomènes oscillatoires appelés « ondes internes de gravité ». Pour mieux se représenter ces ondes, qu'il ne faut pas confondre avec l'onde gravitationnelle chère à Einstein, il suffit d'évoquer les vagues à la surface de l'océan. Excitées par les mouvements convectifs turbulents, ces ondes transforment le profil de vitesse angulaire. L'interaction de ces différents acteurs, évidemment non linéaire, modifie la dynamique et la structure de l'étoile.
Pour compliquer encore le tableau, les étoiles sont couplées, parfois de manière violente, à leur environnement par l'intermédiaire des vents stellaires, des phénomènes d'accrétion ou d'autres transferts de masse, voire d'effets de marée dans le cas des **systèmes binaires serrés**. Ces couplages modifient à leur tour les processus internes, ce qui rend encore plus complexe l'évolution de l'étoile.
La modélisation de cette évolution dynamique constitue aujourd'hui l'axe central du travail des physiciens stellaires du CEA et de leurs partenaires. Ils mettent ainsi au point, pas à pas, les outils théoriques nécessaires à l'élaboration de modèles de nouvelle génération (figures 3 et 4) ainsi que les simulations numériques des processus magnéto-hydrodynamiques (sur les échelles de temps qui leur sont propres). D'autre part, ils participent simultanément au développement et à l'exploitation des instruments d'observation qui fournissent les contraintes introduites dans les modèles (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90 et *Scruter le Soleil avec GOLF-NG*, p. 130). Fort de ces différentes expertises et grâce au développement simultané des expériences auprès des grands lasers, le CEA s'investit donc dans la mise en place de l'étude de l'évolution dynamique des seuls réacteurs à fusion thermonucléaire naturels que sont les étoiles.


Jon Morse (University of Colorado), and NASA

L'étoile Eta Carina, photographiée par le télescope spatial Hubble, est située à environ 8 000 années-lumière dans la nébuleuse de la Carène. Très massive, plus de 100 fois la masse du Soleil, elle est sans doute très proche d'une explosion imminente. Un petit astre compagnon gravite autour d'elle avec une période de cinq ans, leur interaction provoquant des échanges violents de gaz et de matière.

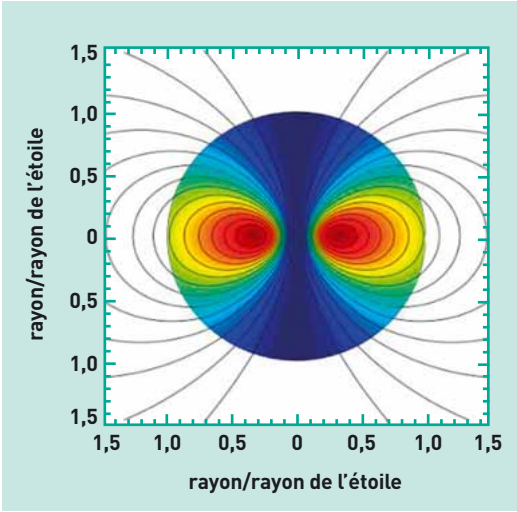


Figure 4.
Champ magnétique fossile d'une étoile de **type A** (de 2,37 fois la masse solaire et trois fois le **rayon solaire**).

> Stéphane Mathis
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

POUR EN SAVOIR PLUS

« Physics, Formation and Evolution of Rotating Stars » par André Maeder, *Astronomy & Astrophysics Library*, Springer (2009).

L'explosion des supernovae

ESO

La nébuleuse du Crabe a été découverte en 1731 par le physicien britannique John Bevis. Il s'agit des restes de l'explosion d'une supernova qui s'est produite en 1054, et a été observée par des astronomes d'Extrême-Orient.

Certaines **étoiles** finissent leur vie dans une gigantesque explosion, projetant dans le **milieu interstellaire** la matière qu'elles ont synthétisée pendant des millions d'années. Ces phénomènes, appelés **supernovae**, sont tellement lumineux que certains ont été vus à l'œil nu. En 1054, les astronomes chinois ont ainsi observé une « étoile supplémentaire », en fait l'explosion qui a donné naissance à la nébuleuse du Crabe. Environ deux supernovae explosent chaque siècle dans **notre Galaxie**, mais les télescopes automatiques en détectent plusieurs centaines par an dans l'ensemble des autres **galaxies**. Les **cosmologistes** les recherchent activement car elles permettent de mesurer les distances dans l'Univers. De plus, elles stimulent la formation de nouvelles étoiles et représentent une source majeure de **rayons cosmiques**.

On sait que les étoiles comparables au **Soleil** n'explosent pas : elles finissent leur vie en se dispersant lentement tandis qu'une **naine blanche** se forme en leur centre. Quelles sont donc ces étoiles dont la mort est si violente ? Les supernovae observées se répartissent en deux catégories, thermonucléaire et gravitationnelle, selon que leur progéniteur est une naine blanche ou le cœur de fer d'une étoile au moins neuf fois plus massive que le Soleil.

Lorsqu'une naine blanche parvient à capter suffisamment de matière d'une étoile voisine pour grossir jusqu'à la **masse critique de Chandrasekhar** (environ 1,4 fois la **masse du Soleil**), les réactions nucléaires en son centre s'emballent. La **fusion** du carbone et de l'oxygène en **éléments** plus **lourds**, comme le fer, libère alors assez d'énergie pour pulvériser intégralement l'astre. Une supernova thermonucléaire est née.

En revanche, le fer synthétisé au cœur d'une **étoile massive** ne peut libérer d'énergie nucléaire, ni par fusion, ni par **fission**. Lorsque sa masse atteint la limite de Chandrasekhar, le cœur de fer s'effondre sous son propre poids jusqu'à la formation d'une **étoile à neutrons**. Son diamètre diminue d'un facteur cent en moins d'une seconde, libérant une énergie **gravitationnelle** considérable essentiellement sous forme de **neutrinos**, et aussi de **photons** (figure 1). En 1987, les observatoires terrestres ont capté les neutrinos provenant de la supernova gravitationnelle SN1987A, confortant ainsi la compréhension théorique de ce phénomène.

Une instabilité créatrice

Certaines questions demeuraient cependant sans réponse. Comment expulser rapidement les couches successives de carbone, oxygène, **hélium** et **hydrogène** qui entourent le cœur de fer effondré, avant que la masse de l'étoile à neutrons centrale n'atteigne le seuil critique de formation d'un **trou noir** (environ 3 masses solaires) ? Ce trou noir engloutirait en effet rapidement toute l'étoile, sans explosion spectaculaire. En 1985, les physiciens américains Hans Bethe et James Wilson proposaient un scénario d'explosion retardée, selon lequel les neutrinos déposent suffisamment d'énergie dans l'enveloppe pour l'expulser. Les **simulations numériques** semblaient infirmer ce scénario, jusqu'à la découverte en 2003 des effets bénéfiques d'une nouvelle instabilité hydrodynamique. Celle-ci se développe à moins de 200 kilomètres du centre de l'étoile à neutrons, pendant quelques dixièmes de seconde après sa formation. Les travaux théoriques conduits au Service d'astrophysique du CEA/Irfu ont élucidé son mécanisme par l'interaction entre **ondes** acoustiques et tourbillons de matière (figure 2). Les mouvements **turbulents** qu'elle induit ont pour effet de retarder la chute de l'enveloppe vers l'étoile à neutrons, et de l'exposer ainsi plus longtemps au flux de neutrinos. Cet effet décisif semble être la clé d'une explosion réussie.

Cette instabilité est déterminante pour le mécanisme d'explosion et le destin de l'étoile à neutrons résiduelle. D'après les simulations numériques, elle est en particulier responsable du caractère asymétrique de l'explosion. Cette asymétrie propulse l'étoile à neutrons dans l'espace, à des vitesses pouvant dépasser 1 000 kilomètres par seconde, en bon accord avec les observations.

Les travaux futurs doivent permettre de mieux comprendre la diversité des explosions de supernovae, en particulier leur lien avec les **sursauts gamma**.

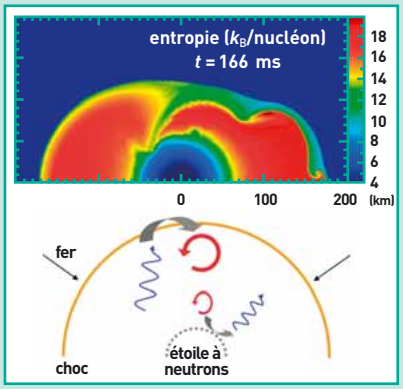


Figure 2.
Simulation numérique de l'instabilité - définie par l'**entropie** exprimée en k_B par **nucléon** - qui déforme le choc de façon asymétrique (collaboration **MPA** Garching). Son mécanisme est fondé sur l'interaction entre ondes acoustiques (flèches bleues) et tourbillons (flèches rouges), qui forment un cycle instable.

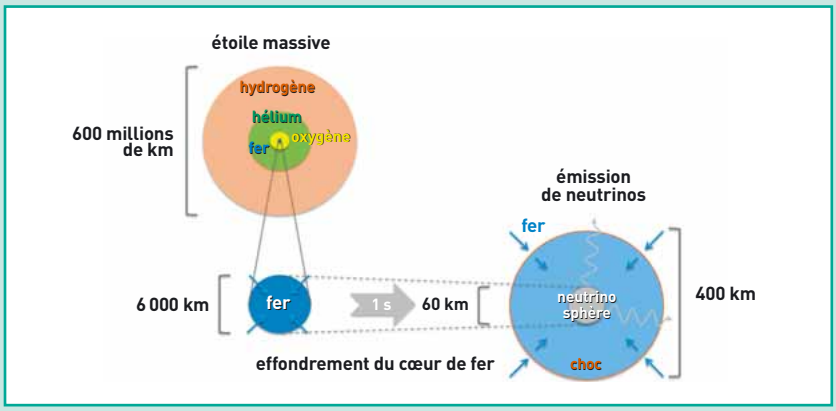


Figure 1.
Vue schématique d'une supernova gravitationnelle. L'effondrement du cœur de fer d'une étoile massive est ralenti par une onde de choc stationnaire, à environ 200 kilomètres du centre.

> Thierry Foglizzo
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Les restes de supernova

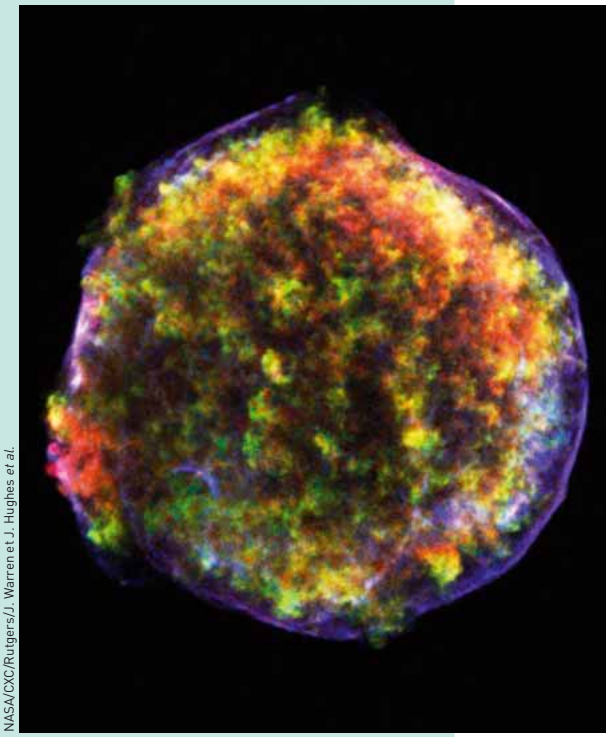
L'explosion d'une **supernova** libère une énergie énorme (de l'ordre de 10^{44} **J**), dont seule une petite fraction sous forme de **lumière visible**. Au moment de l'explosion, une supernova **brille** autant qu'une **galaxie** entière, mais sa lumière visible décroît ensuite assez rapidement et disparaît en quelques années. Dans la **Voie lactée**, les plus récentes observations de supernovae datent de la fin du 16e et du début du 17e siècle. Bien que des instruments exceptionnels soient maintenant à la disposition des astronomes, que ce soit au sol ou dans l'espace, aucune nouvelle supernova n'a pu être observée dans notre Galaxie ! Or il se produit en moyenne 2 ou 3 explosions par siècle dans une **galaxie spirale** telle que la nôtre. Une dizaine de supernovae ont donc dû exploser durant les quatre derniers siècles, mais cela a vraisemblablement eu lieu dans des régions obscurcies.

Les **éléments lourds** synthétisés durant la phase finale de la vie de l'**étoile** sont dispersés par l'explosion et enrichissent le **milieu interstellaire** et intergalactique. Les restes de l'astre détruit perdurent plusieurs milliers d'années dans l'espace et les **rayons X** émis fournissent de précieux indices sur la nature et la physique de telles explosions.

Un reste de supernova est une structure complexe. La matière stellaire, éjectée à très grande vitesse (quelque 10 000 km/s) par l'explosion, percute le milieu interstellaire environnant et, comme un piston, le repousse. Dans une première phase, qui dure moins de mille ans, deux chocs opposés façonnent la structure. D'une part le choc de l'explosion, qui se propage vers l'extérieur dans le milieu environnant, d'autre part le choc en retour, lié à la décélération des débris stellaires par le milieu, qui se propage vers l'intérieur dans la matière éjectée. Plus tard, le milieu interstellaire prend le dessus et la matière fraîchement synthétisée ne domine plus. Comprimés et chauffés à des dizaines de millions de degrés par les chocs, les débris stellaires et le milieu environnant deviennent de puissants émetteurs de rayons X. C'est ce qui permettra de les détecter. L'atmosphère terrestre constituant un écran à ces rayons, les observations depuis le sol sont impossibles : il faut placer les instruments en orbite. Les satellites européen XMM-Newton (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90) et américain Chandra ont apporté une moisson de résultats nouveaux dans ce domaine.

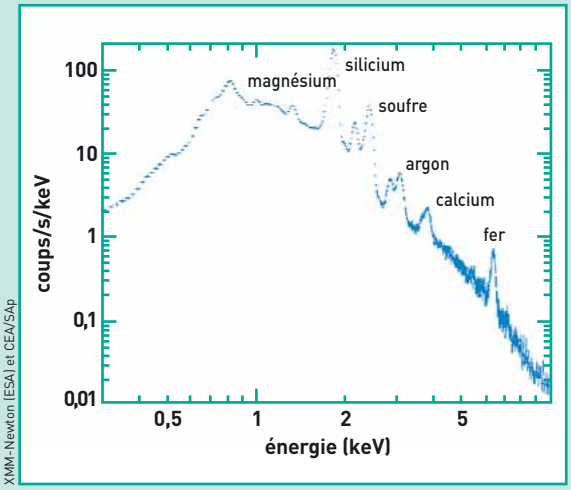
Des rayons très instructifs

Les deux télescopes ont notamment pointé dans la direction de la supernova observée en 1572 par l'astronome danois Tycho Brahé (supernova dite de Tycho). La figure 1 montre l'image en rayons X du reste de cette supernova, prise 432 ans après l'explosion. Son **spectre** global (figure 2) dénote la présence d'éléments lourds très **ionisés** comme le silicium, le soufre, l'argon et le fer. La composition du spectre permet par exemple de distinguer les explosions thermonucléaires des explosions gravitationnelles (voir *L'explosion des supernovae*, p. 26). La répartition spatiale des éléments dans les éjectas apporte un nouvel éclairage sur les processus de mélange des couches dans la supernova ou sur l'asymétrie de l'explosion. L'émission en rayons X fournit aussi des renseignements sur des processus physiques tels que les instabilités hydrodynamiques se développant à l'interface entre la matière éjectée et le milieu ambiant. Des **simulations numériques** à trois dimensions sont ensuite confrontées aux observations. Les instruments X peuvent aujourd'hui réaliser de la **spectroscopie spatialement résolue** (permettant la production d'images dans des bandes d'énergie étroites, comme des **raies d'émission**, et la spectroscopie dans des régions spatiales de petite extension), ce qui a ouvert l'étude de la physique des chocs dits « non collisionnels ». Cela a en particulier apporté une meilleure compréhension de l'accélération des **rayons cosmiques** par les restes de supernova (voir *Élucider le mécanisme d'accélération des rayons cosmiques*, p. 50).



NASA/CXC/Rutgers/J. Warren et J. Hughes *et al.*

Figure 1.
Image en rayons X du reste de la supernova de Tycho observé par le satellite Chandra plus de 400 ans après l'explosion. La matière éjectée (en rouge ou en vert selon sa composition chimique) apparaît grumeleuse du fait d'instabilités hydrodynamiques. L'onde de choc se propageant dans le milieu interstellaire ambiant est signalée par un fin filament d'émission synchrotron (en bleu) produite par des électrons accélérés à des vitesses proches de celle de la lumière.



XMM-Newton (ESA) et CEA/SAp

Figure 2.
Spectre en rayons X du reste de la supernova de Tycho, obtenu par l'une des caméras du satellite XMM-Newton plus de 400 ans après l'explosion. Il montre d'intenses raies d'émission provenant d'éléments lourds synthétisés juste avant et lors de l'explosion. Ces éléments, chauffés à des dizaines de millions de degrés par le choc se propageant dans la matière éjectée, sont fortement ionisés. L'étude de ces raies renseigne sur la nature de la supernova (explosion thermonucléaire ou effondrement gravitationnel).

> **Anne Decourchelle** et **Jean Ballet**
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles
(CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Astres de haute énergie : des sources de surprises

Les « cadavres » d'étoiles, objets peu visibles et d'une extrême densité, peuvent devenir de puissantes sources de rayonnement s'ils sont associés à une étoile compagnon. Grâce aux nouveaux moyens d'observation, le bestiaire de ces astres de haute énergie n'en finit pas de s'enrichir.

S. Chaty/ESA

Vue d'artiste d'un système binaire de grande masse, composé d'une étoile à neutrons orbitant autour d'une étoile supergéante. L'étoile à neutrons accrète de la matière du vent stellaire, dense et inhomogène, éjecté par l'étoile supergéante. L'étude des astres de haute énergie permet non seulement d'accéder à la physique de la matière condensée mais aussi à celle des plasmas de très haute température. Ces objets sont idéaux pour mieux comprendre les phénomènes d'accrétion-éjection et, dans certains cas, les vents stellaires d'étoiles massives.

À la fin de leur évolution, certaines **étoiles** se transforment en objets extrêmement compacts : **naines blanches**, **étoiles à neutrons** ou **trous noirs stellaires**. Ces trois types d'astres se distinguent par leur densité. Une naine blanche contient typiquement la **masse du Soleil** dans une sphère d'environ 6 000 km de rayon. Une étoile à neutrons confine une masse comparable dans une sphère de seulement 15 km de rayon. Enfin un trou noir de 10 masses solaires aurait un « rayon » de 30 km (correspondant à l'**horizon des événements**). Ces étoiles « mortes » n'émettent que peu de rayonnement lorsqu'elles sont isolées, ce qui les rend peu visibles ou même invisibles à nos yeux. En revanche, ces objets peuvent devenir extrêmement **brillants** s'ils sont l'une des composantes d'un **système binaire**, c'est-à-dire s'ils sont liés par **gravité** à une étoile compagnon dont ils attirent la matière. Un tel système s'appelle « variable cataclysmique » si l'objet compact est une naine blanche, ou « binaire X » dans le cas d'une étoile à neutrons ou d'un trou noir. Cet article s'intéresse aux binaires X.

De puissants émetteurs

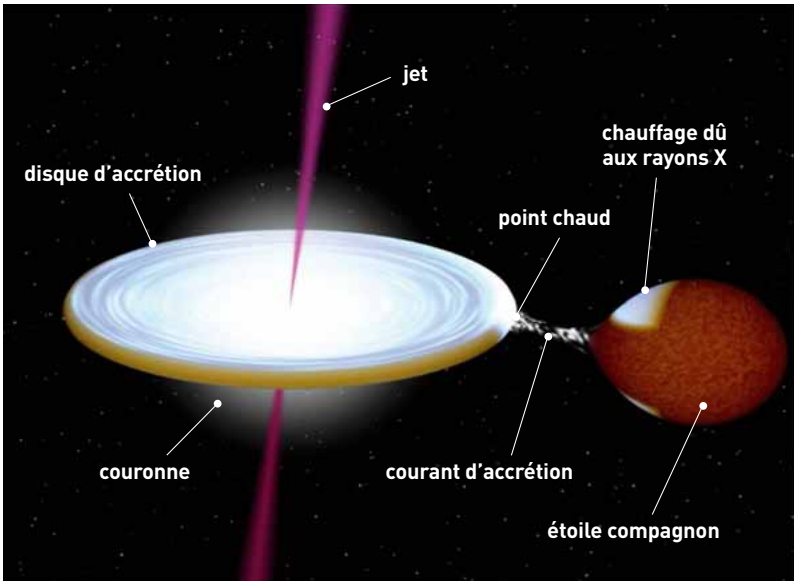
La chute de matière transforme une partie de l'énergie potentielle de **gravitation** en énergie rayonnée. Étant donné l'extrême densité de l'objet, la matière atteint des températures très élevées (environ 10 millions de degrés) et émet des **rayons X**. D'où le nom de ces systèmes. Lorsque le compagnon est une **étoile massive** (de masse supérieure à une dizaine de fois celle du Soleil), il engendre un **vent stellaire** intense que l'objet compact intercepte et **accrète** directement. De tels objets brillent peu, et peuvent même être enfouis dans le vent stellaire. Si au contraire l'astre compagnon est moins massif que le Soleil, l'objet compact arrache de la matière à ses couches externes. En raison de la conservation du **moment cinétique**, cette matière en provenance d'une étoile en rotation dans un système binaire ne peut pas tomber directement sur l'objet compact. Un **disque d'accrétion** se forme donc : la matière parcourt une spirale, se rapprochant peu à peu de l'objet compact tout en s'échauffant… et en émettant un copieux

flot de rayons X. De plus, une couronne d'**électrons relativistes** englobe l'objet central et émet des **rayons** X et **gamma** par **effet Compton inverse** (figure 1). Pour caractériser ces astres de haute énergie et leur environnement, les astronomes utilisent donc des télescopes à rayons X et gamma, comme XMM-Newton et INTEGRAL auxquels le CEA/Irfu a largement contribué (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90), mais aussi des détecteurs d'**ondes radio** et de **rayonnements infrarouges/visibles**.

La découverte de microquasars

Au-delà de l'image du trou noir accrétant de la matière d'une étoile compagnon, des astrophysiciens du CEA/Irfu ont montré dans les années 1990 que de tels objets pouvaient éjecter massivement du **plasma** sous forme de jets à des vitesses apparemment supérieures à celle de la lumière (figure 1). Ces astres furent appelés microquasars par analogie avec les **quasars**, noyaux actifs de **galaxies** contenant en leur centre un trou noir supermassif (d'une masse de l'ordre de quelques millions à quelques milliards de fois celle du Soleil). Cette découverte révolutionna les recherches dans ce domaine. En effet, il pourrait exister une universalité des mécanismes physiques entre ces deux populations de trous noirs. Or les manifestations physiques au sein des microquasars se déroulent sur des échelles de temps réduites (de la milliseconde à l'année). Cela permet enfin d'étudier, même indirectement, des phénomènes similaires à ceux se produisant au sein des noyaux actifs de galaxies… mais sur des durées tellement longues qu'elles sont inaccessibles à l'échelle humaine. Diverses propriétés du flot (ou courant) d'accrétion se firent alors jour, et il devint évident que le disque était fortement couplé aux jets relativistes par l'intermédiaire d'une couronne d'électrons chauds qui alimente ces derniers (figure 1). En outre, la présence de matière **ionisée** au sein du disque d'accrétion induit la formation de **raies** de matériaux comme le fer. Les effets gravitationnels dus à l'objet compact modifient le profil d'émission de la matière du disque en rotation. À l'avenir, grâce entre autres à XEUS (*X-ray Evolving Universe Spectroscopy mission*)/IXO (*International X-ray Observatory*), ces **raies d'émission** renseigneront les astronomes sur la vitesse de rotation des trous noirs, un de leurs trois paramètres fondamentaux avec la masse et la charge électrique.

La découverte de diverses corrélations (flux dans différentes bandes d'énergie, fréquences d'oscillations quasi périodiques, caractéristiques spectrales, etc.) démontra de plus que ces jets de matière peuvent émettre dans les domaines X et gamma, soit bien au-delà de leur domaine classique de rayonnement en ondes radio. En quelques années, les jets relativistes se sont donc révélés comme de puissants émetteurs multi-longueurs d'onde. La découverte directe d'une émission de rayons X lors de leur interaction avec le **milieu interstellaire** le confirma (figure 2). Elle prouva en effet sans ambiguïté que ces jets contiennent des particules de très hautes énergies (> **TeV**). Une émission jusqu'aux rayons gamma est possible : des observatoires tels que Fermi ou HESS pourraient alors les détecter (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90).

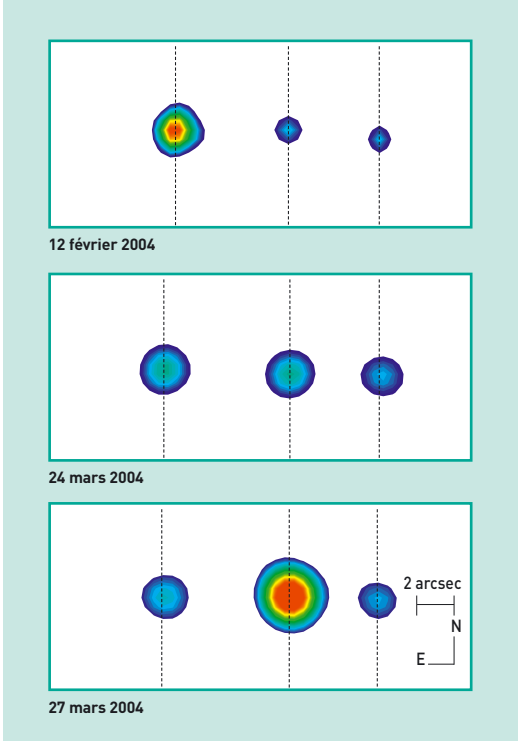


Rob Hynes

Figure 1.
Vue d'artiste d'un microquasar. La matière arrachée de l'étoile compagnon tombe dans le trou noir dans un mouvement en spirale. Un disque se forme autour de l'astre dense et des jets de matière apparaissent.

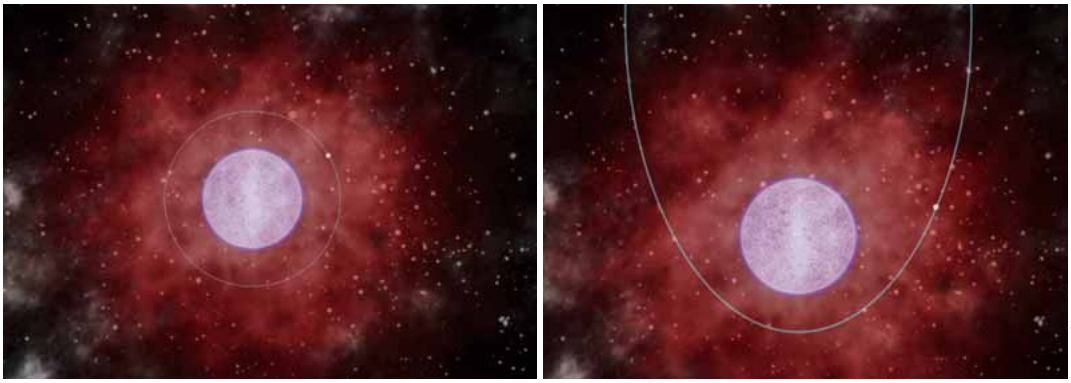
Des quasars « intermédiaires » ?

Un nouveau mystère est apparu ces dernières années. Les puissants observatoires actuels, comme XMM-Newton, ont détecté des sources très importantes de rayons X dans de nombreuses galaxies proches de la **Voie lactée**. Or ces objets semblent bien trop **lumineux** pour être assimilés à des systèmes binaires X. D'où l'idée qu'il pourrait s'agir de trous noirs d'une masse intermédiaire entre celle des microquasars et celle des noyaux actifs de galaxies, soit de quelques centaines à quelques milliers de fois celle du Soleil. Néanmoins, les théories actuelles expliquent difficilement la



S. Corbel

Figure 2.
Image de l'émission X autour du microquasar H 1743-322. De part et d'autre de la source centrale, on observe deux sources X mobiles dues à l'interaction de bulles de plasma relativiste avec le milieu interstellaire.



S. Chaty/CEA

Figure 3.
À gauche, un astre enfoui, où l'étoile à neutrons orbite près de l'étoile supergéante, constamment à l'intérieur du vent stellaire.
À droite, une « transitoire rapide », où l'étoile à neutrons, sur une orbite excentrique, pénètre régulièrement dans le vent de l'étoile.

formation de tels trous noirs. Les observations multi-longueurs d'onde apporteront un nouvel éclairage sur ces astres. Soit elles prouveront l'existence d'une nouvelle classe d'objets exotiques, soit il faudra revoir certaines théories admises concernant les disques d'accrétion.

Des sources mystérieuses

À l'intérieur même de la Voie lactée, l'observatoire INTEGRAL a lui aussi découvert, en janvier 2003, un nouveau type de sources de rayons X. Elles sont concentrées dans le plan galactique, et principalement dans la direction des bras. Un programme intensif d'observations a alors été lancé, et les observatoires XMM-Newton, Chandra et Swift ont localisé précisément une trentaine des sources découvertes par INTEGRAL. Les informations spectrales ont révélé que beaucoup d'entre elles présentent une forte **absorption** intrinsèque, inhabituelle pour des astres de haute énergie. Cela constitua une première surprise, mais d'autres allaient suivre…

En plus de ces observations des rayons X, les astrophysiciens du CEA/Irfu ont entrepris un programme multi-longueurs d'onde afin de révéler la nature de ces sources. Cette étude combine, pour un échantillon de ces objets, une **astrométrie** précise, une **photométrie** et une **spectroscopie** en **lumière visible** et **infrarouge** (**proche** et **moyen**). Ici survint la deuxième surprise : la majorité de ces objets sont des systèmes binaires de grande masse comprenant des étoiles **supergéantes** – étoiles très évoluées sorties de la **séquence principale** – alors qu'avant le lancement d'INTEGRAL, la plupart des systèmes binaires massifs connus contenaient des étoiles Be – étoiles de la séquence principale de **type spectral** précoce, en rotation tellement rapide sur elles-mêmes qu'elles créent un disque de matière les entourant.

De surprise en surprise

Ces nouveaux astres de haute énergie semblent intrinsèquement obscurcis, c'est-à-dire qu'eux-mêmes absorbent une partie de leur rayonnement. L'astre IGR J16318-4848 en constitue un exemple extrême : il s'agit d'une étoile à neutrons orbitant autour d'une étoile supergéante d'un type spectral très rare, noté sgB[e] à cause de la présence de raies d'émission « interdites »[1]. Les observations dans l'infrarouge moyen ont montré que ces objets apparaissent obscurcis à cause de la présence de matériau absorbant (poussière et/ou gaz froid) entourant le système binaire dans son ensemble. L'étoile à neutrons orbite donc à l'intérieur d'un cocon de gaz froid formé par le vent de l'étoile supergéante.

Enfin, une troisième caractéristique révélait une sous-population encore plus inhabituelle parmi ces objets. Certaines de ces sources présentent en effet des sursauts d'activité très rapides, de l'ordre de l'heure, et se produisant de manière apparemment anarchique. Ces astres ont été nommés « transitoires rapides de rayons X à supergéante ». L'archétype en est IGR J17544-2619.

L'échantillon de sources étudiées s'amplifiant, il apparaît maintenant que les différences entre les astres enfouis et les transitoires rapides proviennent essentiellement de caractéristiques orbitales (figure 3). En effet, les astres enfouis s'apparentent aux systèmes binaires de grande masse classiques, contenant une supergéante avec une étoile à neutrons parcourant une orbite très proche, à 2 ou 3 rayons stellaires seulement. L'accrétion de matière – à partir du vent de l'étoile – se fait donc en permanence, et l'émission en rayons X est persistante. Les « transitoires rapides » sont des systèmes où l'étoile à neutrons se trouve loin de l'étoile compagnon, sur des orbites circulaires ou excentriques. C'est lorsque l'objet compact traverse le vent de l'étoile, inhomogène et parsemé de grumeaux, que se produisent les sursauts rapides d'activité. Quand il se trouve loin de l'étoile, en revanche, il n'y a pas ou peu d'émission de rayons X.

Finalement, il semble qu'il existe dans la nature un continuum de ces systèmes binaires de grande masse, dont les caractéristiques d'émission dépendent de la proximité entre objet compact et étoile compagnon, et de la nature de l'orbite. C'est donc l'interaction entre les deux composants du système qui régit les propriétés de ces astres de haute énergie.

> **Sylvain Chaty, Stéphane Corbel** et **Jérôme Rodriguez**
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

(1) Raies spectrales émises par un **atome** se désexcitant selon un mode très peu probable.

MÉMO A

Sonder l'Univers sur toute la gamme lumineuse

La lumière est une onde électromagnétique qui peut être caractérisée par sa longueur d'onde ou sa fréquence. Les différents types de rayonnements se distribuent le long du spectre électromagnétique en fonction de leurs longueurs d'onde, des plus courtes (les rayons gamma) aux plus longues (les ondes radio), en passant par la lumière visible (figure 1). Il est aussi possible de décrire la lumière en termes d'une particule sans masse, le photon, dont l'énergie est proportionnelle à la fréquence.

NASA, ESA, STScI, J. Hester and P. Scowen (Arizona State University)

ESO

Les trois « Piliers de la création » dans la nébuleuse de l'Aigle, observés par le télescope spatial Hubble en visible (à gauche) et en infrarouge (à droite). Le rayonnement infrarouge permet de voir à travers les nuages.

Les types de rayonnements

Le rayonnement radio (ou ondes radio) couvre la zone des fréquences inférieures à 1 GHz, ce qui correspond à des longueurs d'onde supérieures à 30 cm. Le domaine des micro-ondes s'étend sur la gamme 30 cm (1 GHz) – 1 mm (300 GHz). Les longueurs d'onde relatives au rayonnement infrarouge IR sont comprises entre 780 nm et 1 mm. Ce domaine est subdivisé en IR proche (780 nm – 2,5 µm), IR moyen (2,5 – 27 µm), IR lointain (27 – 100 µm) et IR submillimétrique (100 µm – 1 mm). L'infrarouge est souvent relié à la chaleur car, à température ambiante, les objets émettent spontanément ce type de lumière. La lumière visible est la partie du spectre électromagnétique à laquelle l'œil humain est sensible. Ce domaine couvre un intervalle de longueurs d'onde allant de 380 nm (violet) à 780 nm (rouge). Les longueurs d'onde du rayonnement ultraviolet UV se situent entre 380 nm et 10 nm. Les rayons X sont des ondes électromagnétiques de haute fréquence dont la longueur d'onde est comprise entre quelques fractions de nm (0,01 nm) et 10 nm. On distingue les rayons X mous (les plus grandes longueurs d'onde) et les rayons X durs (de petite longueur d'onde). L'énergie des photons associés aux rayons X varie entre 100 eV et 100 keV. Les rayons gamma (γ) ont une longueur d'onde encore plus courte, inférieure à 0,01 nm et les photons correspondants ont une grande énergie, supérieure à 100 keV.

Nos yeux ne perçoivent qu'une partie infime de toute la lumière émise par les objets célestes. L'exploitation de toute la gamme des longueurs d'onde a ouvert des fenêtres sur l'Univers, qui ont permis de détecter de nouveaux objets ou montré des objets déjà connus sous un autre jour. Cette capacité à scruter le ciel dans toutes les longueurs d'onde doit beaucoup à la mise en orbite de satellites voués à l'observation des astres, grâce auxquels il a été possible de s'affranchir de l'absorption atmosphérique. Aujourd'hui, tous les domaines de longueurs d'onde sont exploités en permanence et corrélés entre eux afin de mieux cerner les mécanismes physiques mis en jeu dans les objets observés.

De plus, l'optique instrumentale a elle aussi vécu une révolution avec la construction de télescopes géants aptes à collecter la très faible lumière en provenance des astres les plus lointains.

Suite page 32

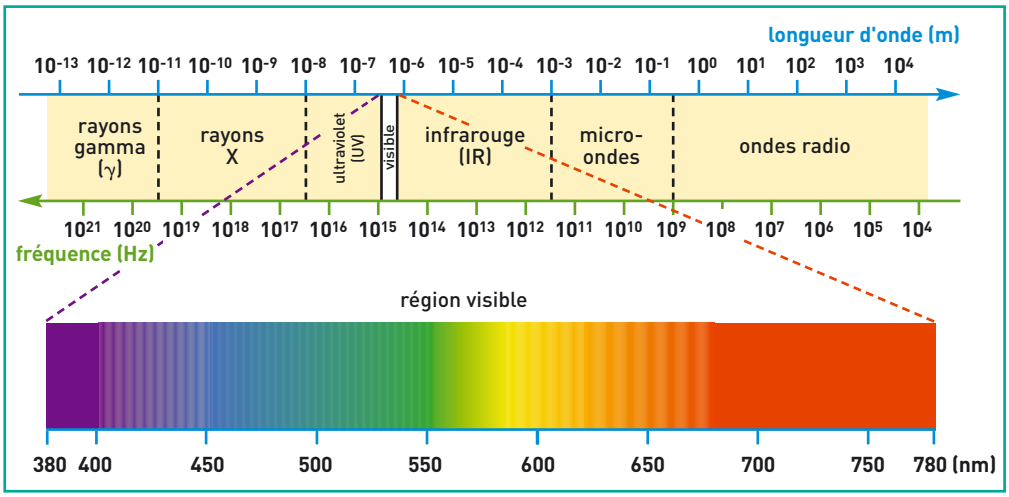


Figure 1.
Spectre électromagnétique.
Les ondes électromagnétiques se répartissent en familles de fréquences et de longueurs d'onde diverses.

MÉMO A

Suite de la page 31

Ces nouveaux télescopes se distinguent également par l'emploi de techniques innovantes qui ont fait accomplir un bond en avant à la qualité des images astronomiques : l'optique active (capacité à déformer la surface du miroir en temps réel) et l'optique adaptative (correction des altérations de l'image dues à l'atmosphère, obtenue par déformation du miroir).

Des spectres riches d'informations

Toute matière dont la température est supérieure au zéro absolu (0 K, soit – 273 °C) émet des ondes électromagnétiques qui forment le rayonnement thermique. À elle seule, la température fixe la puissance émise par un corps, proportionnelle à la puissance quatrième de la température. Ainsi, un corps dont la température absolue est 600 K (soit environ 320 °C) rayonne une puissance lumineuse seize fois plus grande qu'un corps à température ambiante (300 K, soit près de 27 °C). Toutes les longueurs d'onde sont présentes dans le rayonnement thermique mais en quantités inégales. C'est encore la température qui établit le spectre du rayonnement émis, c'est-à-dire la répartition de l'énergie entre les différentes longueurs d'onde présentes. Le maximum d'émission se fait pour une longueur d'onde inversement proportionnelle à la température. Autrement dit, un corps émet l'essentiel de sa lumière pour une longueur d'onde d'autant plus élevée qu'il est froid. Notre principale source de lumière, le Soleil, émet son maximum de puissance pour de la lumière visible jaune dont la longueur d'onde est voisine de 0,5 µm. Ceci correspond à une température de 5 770 K. Par ailleurs, un corps a la capacité d'émettre de la lumière à des longueurs d'onde bien particulières. En effet, un atome ne peut émettre ou absorber une quantité quelconque d'énergie. Son énergie n'est susceptible de varier que par paliers bien définis, qui dépendent de la façon dont est arrangé son cortège d'électrons. Au cours d'une émission ou d'une absorption d'énergie, la répartition électronique de l'atome est modifiée. De la lumière est émise lorsqu'un électron effectue une transition d'un niveau d'énergie élevé vers un niveau d'énergie situé plus bas ; l'absorption de lumière correspond au passage d'un électron d'un niveau d'énergie inférieur vers un niveau supérieur. L'ensemble de ces transitions, qui se manifeste sous forme de raies dans le spectre, est caractéristique d'un atome et constitue sa carte d'identité. Ces raies d'émission se retrouvent aussi chez les molécules, collections d'atomes liés entre eux, seule la gamme de longueurs d'onde concernées étant affectée. Quand un gaz est traversé par de la lumière, il peut absorber celle dont la longueur d'onde correspond à ses raies. Il en résulte un spectre d'absorption, ensemble de raies sombres sur un fond lumineux, une sorte de code-barres qui permet d'obtenir des informations sur la source et sur le gaz absorbant. C'est ainsi que le spectre du Soleil est composé d'un spectre continu couvrant toutes les couleurs de l'arc-en-ciel, sur lequel se superposent des raies d'absorption caractéristiques des atomes présents dans l'atmosphère du Soleil.

Si le spectre d'une source permet de déterminer sa température et sa composition, il offre aussi la possibilité de mesurer bien d'autres paramètres importants. Ainsi, un champ magnétique sépare une raie spectrale en plusieurs raies proches (effet Zeeman). Ce décalage en longueur d'onde est mis à profit pour mesurer l'intensité du champ magnétique de certains objets astronomiques. Le spectre d'une source de lumière est également affecté par son mouvement relatif à l'observateur selon le même principe qui rend plus aigu le bruit d'un véhicule qui s'approche d'un observateur et plus grave celui de l'engin qui s'en éloigne. La variation apparente de fréquence (d'autant plus élevée que la longueur d'onde est plus courte) est proportionnelle à la vitesse relative entre l'observateur et la source. La fréquence s'accroît lorsque la source lumineuse se rapproche de l'observateur (décalage vers le bleu ou blueshift) et décroît lorsqu'elle s'en éloigne (décalage vers le rouge ou redshift). Plus quantitativement, le décalage spectral *z* est égal à la variation relative entre la longueur d'onde observée λ_{obs} et celle prévue dans le référentiel au repos λ_0. En d'autres termes, $z = \lambda_{obs}/\lambda_0 - 1$. Si *z* est positif, le décalage est vers le rouge et si *z* est négatif, il est vers le bleu. Cet effet a été découvert de façon indépendante par le Français Hippolyte Fizeau (1819-1896) et l'Autrichien Christian Doppler (1803-1853). Il est notamment utilisé pour connaître la vitesse de déplacement des étoiles. Ce phénomène physique, nommé de façon générale effet Doppler, est appelé effet Doppler-Fizeau lorsqu'il s'applique aux ondes lumineuses.

Enfin, on constate que les raies du spectre des objets lointains sont systématiquement déplacées vers les grandes longueurs d'onde (vers le rouge pour le spectre visible). Ce décalage vers le rouge est aisément mesurable car les raies spectrales des atomes sont identifiables et leurs caractéristiques bien connues grâce à des mesures en laboratoire (figure 2). Ce phénomène a été interprété

redshift ou décalage vers le rouge	âge de l'Univers au moment de l'émission de lumière (milliards d'années)
0	13,7
0,5	8,7 (63,5 %)
1	6,0 (43,8 %)
2	3,4 (25 %)
3	2,2 (16 %)
5	1,2 (8,7 %)
7	0,8 (5,8 %)
10	0,5 (3,6 %)

Tableau.
Quelques valeurs représentatives de l'âge de l'Univers au moment de l'émission en fonction du redshift de la source observée.

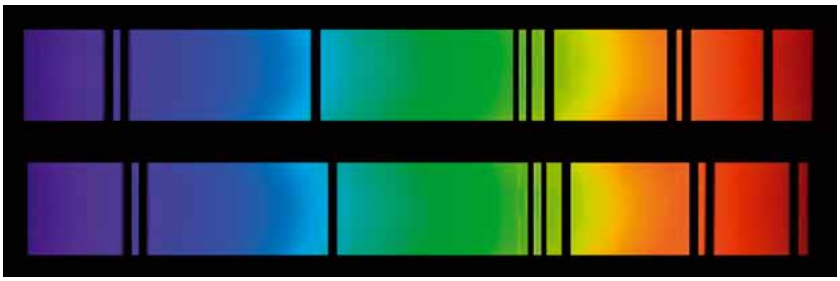


Figure 2.
Spectre d'une source lumineuse sans décalage des raies (en haut) et avec décalage vers le rouge (en bas).

comme la preuve de l'*expansion globale de l'Univers*, qui affecte les échelles cosmologiques. Il résulte du fait que lorsqu'un rayonnement est émis, il nous arrive avec un délai temporel au cours duquel l'espace subit un étirement. C'est pour cela que sa longueur d'onde se dilate. Il est à noter que l'expansion cosmologique transforme le spectre des sources lointaines par un effet purement gravitationnel, sans rapport avec la vitesse de la source relativement à l'observateur (qui est la cause de l'effet Doppler). Le décalage vers le rouge de la lumière des sources lointaines révèle leur distance spatio-temporelle et permet de les classer par éloignement croissant (tableau).

Les lumières de l'Univers

Dans la quête de la compréhension de l'Univers *via* l'observation, les astrophysiciens exploitent l'ensemble du spectre électromagnétique, depuis les ondes radio jusqu'aux rayons gamma, chaque domaine spectral apportant des informations spécifiques (figure 3).

Le *rayonnement micro-ondes*, de grande longueur d'onde, est peu arrêté par la matière. Il sort sans difficulté des nuages sombres et froids à l'intérieur desquels se forment les étoiles. Ce rayonnement est idéal pour percer les secrets de ces nuages et observer les premiers stades du développement des étoiles. Quand naissent les étoiles, elles sont plongées dans la poussière et ne sont visibles que par leur *rayonnement infrarouge*. Regroupées dans le ciel en amas, les jeunes étoiles se révèlent en *lumière visible*. La source d'énergie qui permet à une étoile de briller durablement provient des réactions nucléaires se produisant en son sein tout au long de sa vie. Une étoile ne vit pas éternellement et connaît une fin de vie mouvementée, au cours de laquelle son cœur très chaud et très dense finit par se révéler. Il brille alors d'une intense *lumière ultraviolette*. Les objets très chauds, de température supérieure à 10 000 K, émettent préférentiellement des rayonnements ultraviolets. Ceux de température supérieure au million de degrés émettent des rayons X. La mort spectaculaire des étoiles répand un souffle brûlant visible en rayons X. Certaines étoiles mortes laissent derrière elles un cœur très dense dans l'espace. Dans certains cas, plus extrêmes encore, le cœur de l'étoile se convertit en un astre plus exotique, un trou noir, dont la masse est susceptible d'atteindre une dizaine de fois la masse du Soleil. Le trou noir n'émet pas de lumière, mais la matière qui tombe sur lui peut être portée à de très fortes températures. Elle émet alors un rayonnement de haute énergie, sous forme de *rayons X* et *gamma*.

Combiner l'ensemble du spectre électromagnétique est donc essentiel pour comprendre la structure et l'évolution de l'Univers, chaque rayonnement révélant un aspect différent.

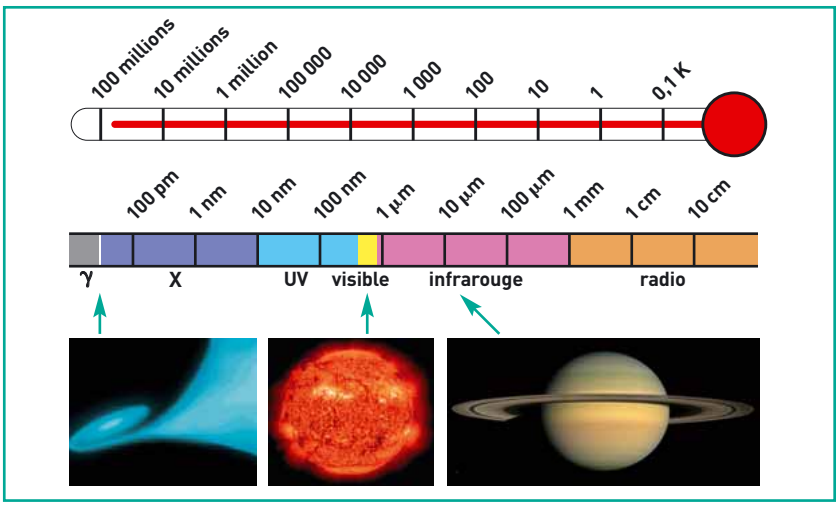
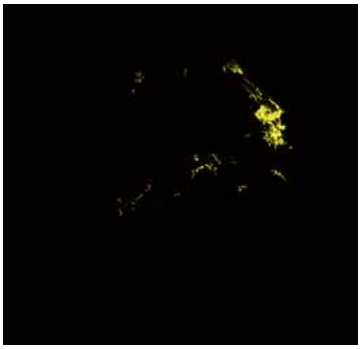
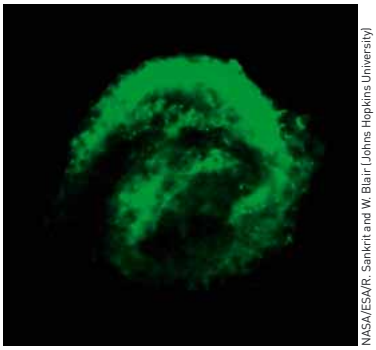


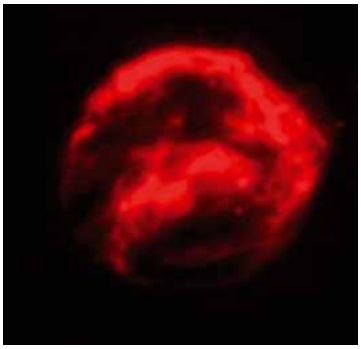
Figure 3.
La distribution du rayonnement renseigne sur la température d'un astre et sur ses caractéristiques. Dans deux grandes parties du spectre électromagnétique, l'infrarouge d'une part, les rayons X et gamma de l'autre, les progrès de la détection spatiale permettent, par des mesures de plus en plus fines, d'accéder à des informations majeures sur les premières étoiles et galaxies.


NASA/ESA/R. Sankrit and W. Blair (Johns Hopkins University)

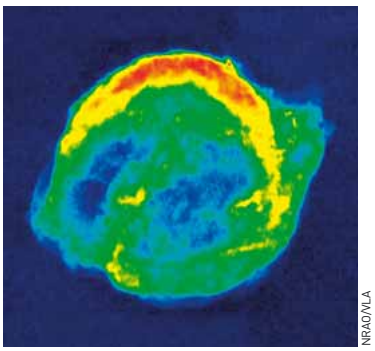
visible


NASA/ESA/R. Sankrit and W. Blair (Johns Hopkins University)

rayons X


NASA/ESA/R. Sankrit and W. Blair (Johns Hopkins University)

infrarouge


NRAO/VLA

ondes radio

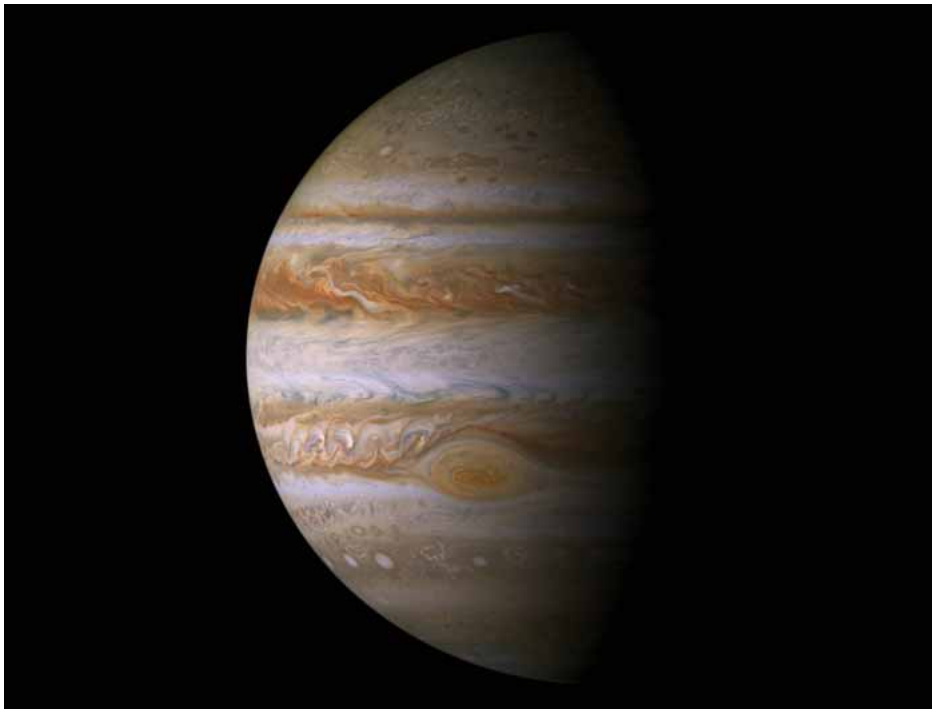
Reste de la supernova de Kepler (SN 1604), dont l'explosion visible à l'œil nu a été observée en 1604 par l'astronome allemand Johannes Kepler. La bulle de gaz émet aujourd'hui très peu de lumière visible. Elle brille en rayons X, en infrarouge et en ondes radio.

L'exploration du système solaire nous l'a appris, et la découverte d'exoplanètes l'a confirmé : la Terre n'est qu'une planète parmi d'autres. Elles sont toutes nées dans une nébuleuse de gaz et de poussière entourant une jeune étoile. Dès que l'astre central cesse sa contraction initiale, commence un processus complexe, qui voit des éléments de la nébuleuse se condenser en grains puis en corps plus importants, les planétésimaux, puis en embryons. Loin de l'astre, ceux-ci finissent par accumuler une masse de gaz importante et deviennent de ce fait des planètes géantes gazeuses. Ces premières-nées, comme Jupiter dans notre système, commandent alors le ballet des planétésimaux intérieurs. Entre accrétions et collisions, ceux-ci engendreront les planètes telluriques comme la Terre. Rien n'est figé cependant, puisque les proto-planètes peuvent migrer à l'intérieur du disque selon des itinéraires variés. Quand et pourquoi cette migration s'arrête est aujourd'hui activement étudié afin de bien comprendre la formation des systèmes planétaires stables.

Les **planètes** : un **ballet** de petits **astres virevoltants** avant le final de leurs **naissances**

Comment est né notre monde

L'exploration du système solaire, la découverte de planètes extrasolaires, de nouvelles idées et de puissantes simulations numériques ont permis de mieux comprendre comment se forment les planètes. Il est alors apparu que le résultat aurait pu être tout autre, tant la forme finale d'un système planétaire dépend des conditions initiales.



NASA/JPL/Space Science Institute

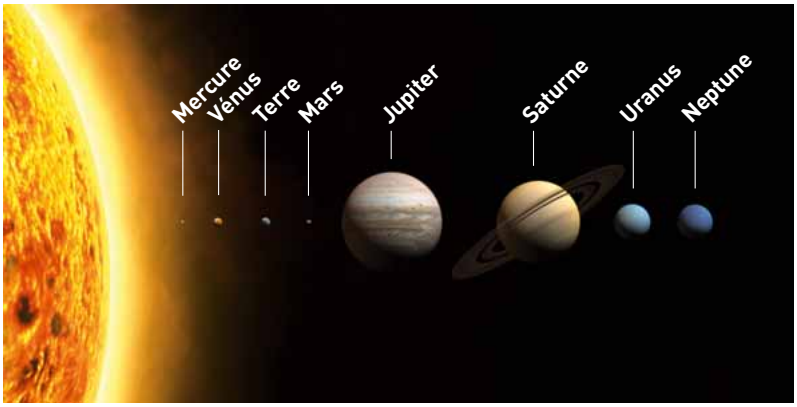
Jupiter vu par la sonde Cassini. Jupiter a déterminé toute l'histoire du système solaire. Il a joué un rôle au moment de la formation de Saturne et a aidé à celle des autres géantes, et même des planètes telluriques. En particulier, il était juste « au bon endroit » pour favoriser l'apparition de notre Terre.

Le siècle qui vient de s'achever restera dans notre histoire comme celui de l'exploration du système solaire. Les hommes ont marché sur notre satellite et rapporté des pierres lunaires pour les analyser dans leurs laboratoires. Des robots ont exploré Mars, étudié sa surface, mesuré ses vents et constaté l'absence de vie. Des sondes automatiques ont atterri sur Vénus, d'autres ont percé ses nuages et révélé les détails de sa surface. La **comète** de Halley, plusieurs autres comètes, des **astéroïdes**, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune et leurs environnements ont reçu la visite d'engins fabriqués par les hommes. Les grands moments de cette exploration ont été les missions Apollo vers la Lune à la fin des années 1960, la mission Viking vers Mars au cours des années 1970 et surtout la mission Voyager qui a atteint les confins du système solaire au cours des années 1980. Le début du 21e siècle coïncide avec le retour vers Mars et vers le monde de Saturne avec la mission Cassini-Huygens, à laquelle participent activement les chercheurs du CEA, qui ont d'ailleurs collaboré à la construction de l'un des détecteurs infrarouges de la sonde.

L'ample moisson de données de ces dernières décennies, qui continue encore aujourd'hui, a bouleversé la pensée scientifique. Des **simulations numériques** sophistiquées ont permis de tester plusieurs **modèles** et d'ouvrir de nouvelles pistes. Les astrophysiciens ont alors réalisé que la Terre est une planète parmi d'autres qu'on peut étudier en la comparant avec ses voisines. Ils ont compris que le système solaire est beaucoup plus riche que prévu, tant par la diversité des corps qui l'habitent que pour la variété des phénomènes physiques qui s'y déroulent. La découverte récente de **planètes** extrasolaires ainsi que l'observation de sites de formation d'**étoiles** ont permis de faire un bond significatif dans la compréhension de nos origines.

Un nuage s'effondre

L'histoire de notre système a commencé il y a environ 4,55 milliards d'années. Quelque part dans la **Galaxie**, un nuage de gaz interstellaire s'est effondré sous son propre poids pour donner naissance à une étoile – le **Soleil** – entourée d'une nébuleuse gazeuse qui s'est très vite aplatie, formant un disque. Les réactions chimiques étant très sensibles à la température, la composition chimique dépendait de la distance au Soleil : de plus de 2 000 **K** près de l'étoile à quelques dizaines de degrés au-dessus du **zéro absolu** aux confins du système solaire. Des composés réfractaires (oxydes d'aluminium, de calcium et de titane, des silicates de magnésium, du feldspath de sodium et de potassium, des oxydes de fer) et bien d'autres minéraux sont ainsi apparus près du Soleil, alors que des glaces d'eau, de dioxyde de carbone, de méthane ou d'ammoniac se formaient à la périphérie. Mais comment passer d'un disque gazeux entourant une proto-étoile au cortège des planètes que nous connaissons ? Dans les années 1980, les astronomes ont imaginé une succession d'étapes conduisant inexorablement à un état final unique avec des planètes telluriques près du centre et des planètes géantes à la périphérie. Tous les systèmes planétaires devraient donc ressembler au nôtre. La détection des planètes extrasolaires, le développement des modèles théoriques et l'exploration même du système solaire ont permis de réaliser, vingt ans plus tard, que le processus de formation d'un système planétaire autour d'une étoile est en fait beaucoup plus complexe et peut conduire à une grande variété de situations finales.



International Astronomical Union

L'exploration du système solaire, menée de pair avec une recherche vigoureuse et avec l'utilisation de nouvelles techniques d'observation à partir de la Terre, a suscité la naissance d'une nouvelle science essentiellement pluridisciplinaire : la planétologie. L'étude comparée des planètes est un excellent moyen de mieux connaître la Terre.

NASA, ESA, N. Smith (University of California, Berkeley), and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

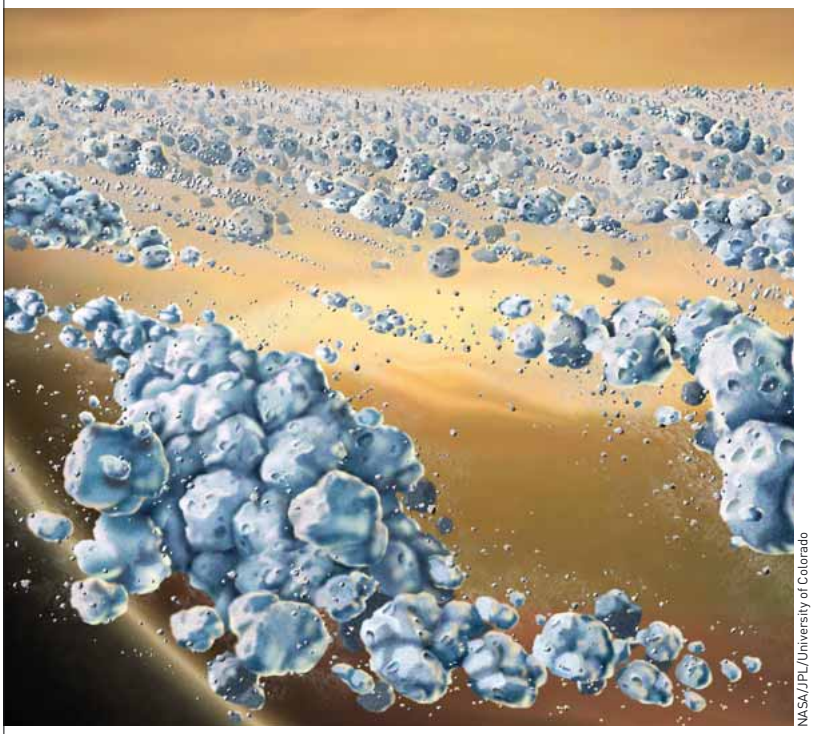
La nébuleuse de la Carène. Grâce à l'observation des sites de formation d'étoiles, les astrophysiciens peuvent imaginer comment il est possible de passer d'un nuage interstellaire à une nébuleuse proto-stellaire puis à un soleil entouré d'un disque de poussières et de gaz.

Dès que le Soleil a cessé sa contraction, un refroidissement brutal s'est produit en un temps relativement court à l'échelle astronomique. En effet, une étoile tirant son énergie des **réactions thermonucléaires** se déroulant en son sein est bien moins **lumineuse** qu'une proto-étoile en plein effondrement. Une partie importante du nuage de gaz s'est alors solidifiée en grains d'une taille de l'ordre de quelques **microns** à quelques millimètres. En quelques dizaines de millions d'années, la nébuleuse gazeuse s'est donc transformée en un disque de grains dont la composition chimique dépend de la distance au Soleil. Au fur et à mesure du refroidissement, divers minéraux et glaces se sont condensés. Les composés réfractaires du calcium, de l'aluminium, du magnésium et du titane se solidifient en dessous de 2 000 K. Les silicates de magnésium, le feldspath de sodium et de potassium, les oxydes de fer le font vers 1 000 K. Vers 300 degrés au-dessus du zéro absolu, la vapeur d'eau se transforme en glace et vers quelques dizaines de degrés, des grains solides de méthane apparaissent. C'est pourquoi seuls les éléments réfractaires et d'autres minéraux se sont solidifiés près du Soleil. À la périphérie du système, au contraire, les glaces d'eau, de dioxyde de carbone, de méthane et d'ammoniac ont dominé la composition des grains. Les variations de densité et de composition au sein du système actuel proviennent donc des conditions de température régnant dans le disque proto-planétaire.

Des « grains » aux planètes

La création de corps tels que les planètes ou les satellites à partir d'aussi petits grains de matière est toutefois restée longtemps mystérieuse. La croissance directe de petits grains en grosses planètes par agglomérations successives demanderait des durées supérieures à l'âge de l'Univers. La solution de l'énigme n'est apparue que dans les années 1970, lorsque des simulations ont montré que, dans un disque de grains relativement calme, des instabilités **gravitationnelles** locales sont inévitablement créées. Des corps de quelques centaines de mètres se forment alors par effondrement. Si au contraire la nébuleuse primitive est animée de violentes **turbulences**, des condensations naissent au centre des tourbillons. Elles ont elles aussi une taille de quelques centaines de mètres. Bref, dans tous les cas apparaissent ces corps de quelques hectomètres, appelés *planétésimaux*. Le disque de grains a donc cédé la place à un disque de planétésimaux.

Par le simple jeu de leurs collisions, ces planétésimaux s'agglomèrent en des corps d'une taille de l'ordre de cinq cents à mille kilomètres, qui peuvent être considérés comme des embryons de planètes. Là encore, les collisions jouent un rôle essentiel dans le résultat final. Lorsque les vitesses relatives des deux protagonistes sont faibles, ils fusionnent. Si au contraire ils se rencontrent à grande vitesse, ils se fragmentent. Pour que le matériau s'accumule progressivement et donne naissance aux planètes, il faut donc des collisions relativement « douces ». Cela ne peut se produire que si les orbites des planétésimaux sont presque semblables, voire, dans l'idéal, qu'elles forment des ellipses concentriques. Si tel est bien le cas, cependant, un corps ne peut rassembler que le matériau se trouvant dans son voisinage immédiat. Le processus d'**accrétion** s'arrête assez vite. Pour qu'un objet accumule plus de matière, il doit « balayer » une plus grande partie du système, donc parcourir une orbite excentrique. Mais cela mène à une contradiction. En effet, les collisions entre ce corps et les autres planétésimaux se produisent alors à des vitesses relatives très élevées… et aboutissent à la cassure des protagonistes. En d'autres termes, à partir d'un disque de planétésimaux, il est relativement concevable d'obtenir un système formé d'une centaine de petites planètes, mais beaucoup plus improbable d'obtenir quelques grosses planètes, comme les huit qui peuplent notre système.



NASA/JPL/University of Colorado

Détail d'un modèle des anneaux de Saturne, montrant qu'ils ont la forme d'un disque très fin de cailloux et de poussières glacés similaires aux planétésimaux, ancêtres des planètes. Mise en orbite autour de Saturne en 2004, la sonde Cassini envoie quotidiennement des données uniques permettant aux chercheurs de développer des modèles de pointe pour simuler divers mécanismes importants.

Planètes telluriques et géantes gazeuses

La formation de planètes de plusieurs milliers de kilomètres de rayon à partir d'embryons grands comme la France n'a pu être étudiée et comprise qu'à l'aide de simulations numériques. Un embryon planétaire, de par sa masse, perturbe le mouvement du matériau diffus situé à son voisinage et attire finalement de grandes quantités de matière. Plus l'accrétion est importante, plus la zone d'influence de l'embryon s'étend. Il semble que, dans notre système comme ailleurs, quelques embryons initialement un peu plus gros que les autres aient ainsi « pris le pouvoir » en ramassant tout le matériau situé aux alentours. Peu à peu, toute la matière disponible s'est rapprochée de ces « dominants ». Dans le même temps, plus les corps en orbite autour du Soleil se raréfiaient, plus les probabilités de collision, donc de fragmentation, diminuaient. Tout concourait donc à la survie de ces quelques objets. Les dernières collisions ont déterminé les directions des axes de rotation

DR

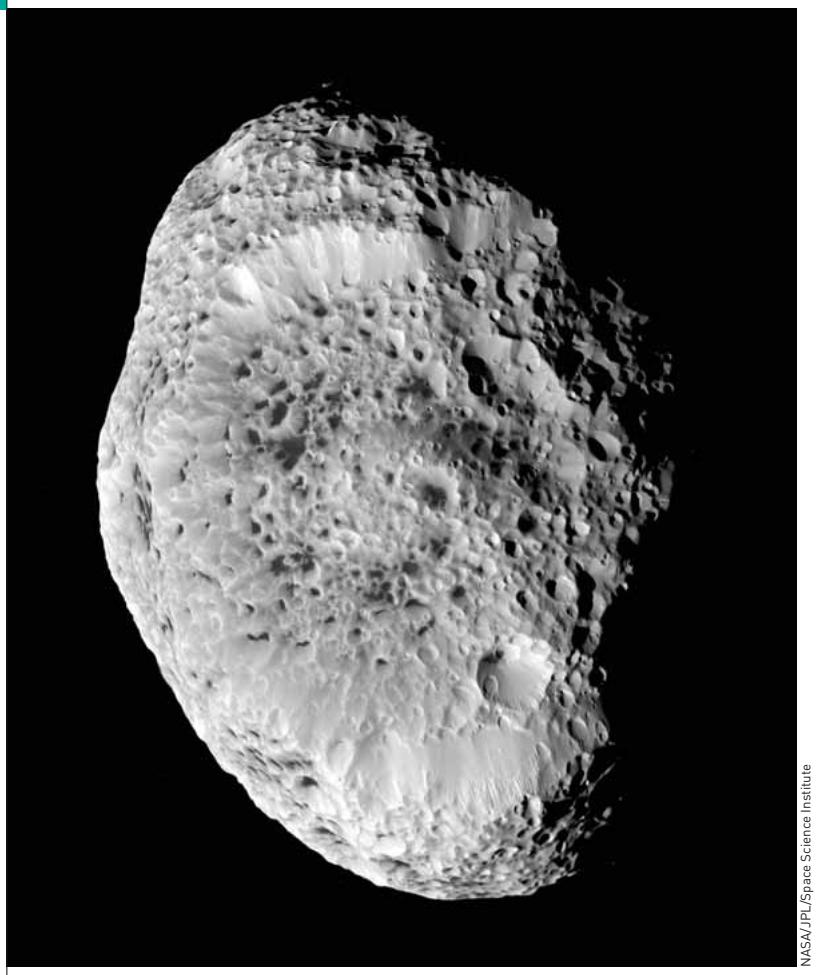
La météorite d'Allende. Grâce aux indices accumulés au sein des météorites et à des simulations numériques sophistiquées, les scientifiques ont compris que le passage d'un disque continu de matière à un disque de planètes a duré quelques dizaines de millions d'années, ce qui est un temps très court à l'échelle astronomique.

des planètes et leur période initiale de rotation. Ce mécanisme est maintenant à peu près universellement admis pour expliquer la formation des planètes telluriques telles que Mercure, Vénus, Mars et la Terre. La naissance des planètes géantes comme Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune a été plus longue à comprendre. Dans les années 1970, les astronomes pensaient que de tels objets se formaient, comme les étoiles, par effondrement local du nuage gazeux. Ce scénario est maintenant rejeté car il faudrait pour cela que le disque de la nébuleuse primitive soit instable et au moins dix fois plus massif que le Soleil, ce qui est peu réaliste. De plus, les géantes gazeuses de notre système ont des compositions nettement différentes de celles du Soleil et de la nébuleuse primitive. Il est apparu plus récemment qu'il fallait également exclure un scénario de type accumulation de planétésimaux, propre aux planètes telluriques. La formation de géantes par cette voie demanderait en effet trop de temps. Il semble finalement que quelques noyaux solides formés par accumulation de planétésimaux aient rassemblé le gaz présent loin du proto-Soleil et que chacun ait donné naissance à une planète géante. Un tel scénario se déroule en plusieurs étapes. Tout d'abord, des planétésimaux s'assemblent en un noyau solide, dense, entouré d'une atmosphère gazeuse de faible masse. Lorsque ce noyau a capturé pratiquement tous les corps solides situés dans sa zone d'influence gravitationnelle, la proto-planète continue de croître en capturant tout le gaz du voisinage. Par un effet « boule de neige », cette capture s'accélère et la planète grossit très rapidement. Ces captures échauffent alors l'ensemble et la température de la nébuleuse qui entoure la proto-planète diminue avec la distance au centre. Cela explique les densités décroissantes avec la distance des satellites (solidifiés ultérieurement) autour des planètes géantes actuelles. Au bout du compte, ayant amassé tout le gaz disponible dans son environnement, la nouvelle planète se trouve isolée dans l'espace, elle finit de se contracter puis se refroidit lentement pour atteindre son état actuel.

Dans ce type de scénario, la formation des planètes géantes a été beaucoup plus rapide que celle des planètes telluriques. Les modèles développés par différentes équipes indiquent que le noyau solide, résultat de l'accumulation de particules plus petites, a été formé en moins d'un million d'années après l'effondrement solaire et que l'accrétion d'une enveloppe gazeuse massive d'**hydrogène** et d'**hélium** a duré moins de dix millions d'années. Jupiter semble avoir été la première planète formée dans le système solaire, et son apparition a façonné la suite de l'histoire. Sa croissance s'est déroulée à un rythme saisissant. Quand le proto-Jupiter a atteint une taille comparable à celle de la Terre, il a capté en moins de mille ans la moitié de sa masse finale (qui vaut environ 300 fois celle de la Terre) ! La chaleur dissipée était alors tellement intense qu'il était presque aussi **brillant** qu'une étoile. La planète est rapidement devenue

NASA/JPL/Space Science Institute

Saturne et ses anneaux vus à contre-jour. La planète a été photographiée par la sonde Cassini alors qu'elle masquait le Soleil. La Terre est visible en haut à gauche. Vous êtes sur la photo !



NASA/JPL/Space Science Institute

Hypérion, un des satellites de Saturne, qui mesure environ 340 km de diamètre. Il est criblé de cratères, indiquant que les satellites et les planètes du système solaire ont fait l'objet d'un bombardement intense d'astéroïdes.

suffisamment massive pour éliminer le gaz restant aux alentours. Elle a en effet « retenu » les **molécules** de gaz comprises entre elle et le Soleil (qui tournaient plus vite qu'elle) et a donc fait tomber ce matériau sur l'étoile. Au contraire, le gaz extérieur étant plus lent qu'elle, elle l'a accéléré, donc éloigné vers la périphérie. La planète a ainsi créé un sillon dans le disque gazeux circumsolaire, ce qui a interrompu l'apport de matière première. Le gaz tend certes à repeupler une telle percée, mais les simulations numériques montrent qu'un Jupiter situé à 750 millions de kilomètres du Soleil (comme c'est le cas actuellement) repousse finalement le gaz. Par ailleurs, plus vite une proto-planète géante est formée, plus grosse elle sera finalement parce qu'il reste encore beaucoup de gaz disponible dans le système. Si Jupiter est plus gros que Saturne, Uranus et Neptune, c'est tout simplement parce qu'il a été formé quelques millions d'années plus tôt.

De l'importance de Jupiter

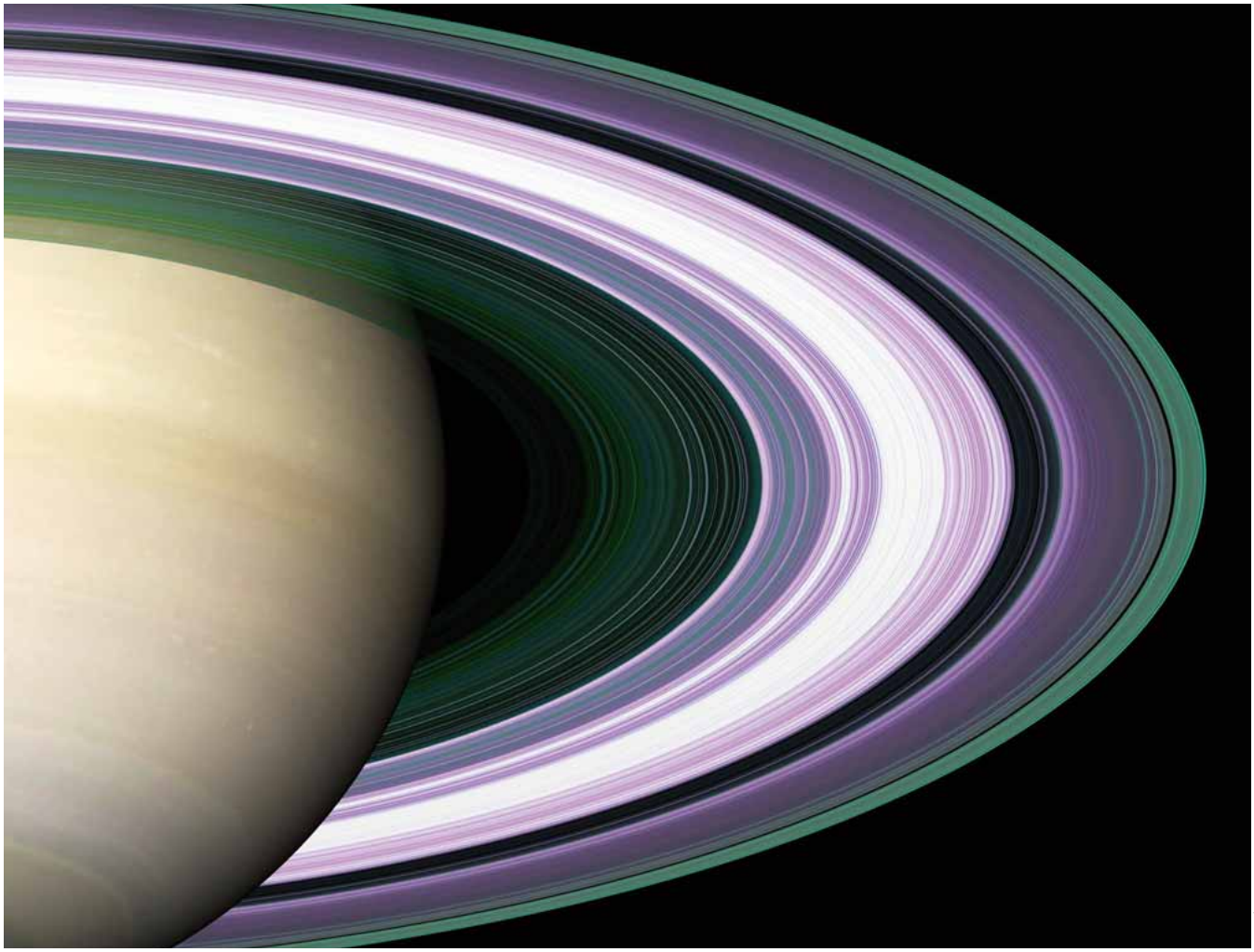
En condensant du gaz dans des régions extérieures, et en éjectant des planétésimaux aux confins du disque par son action gravitationnelle, le jeune Jupiter a alimenté en matières premières la formation des autres planètes géantes. Grâce à ce rôle de collecteur de matériau, Saturne a pu ainsi être formé plus vite. En l'absence de Jupiter, Uranus et Neptune n'auraient probablement jamais atteint leur taille actuelle. En effet, loin de l'étoile centrale, dans les régions de faible densité, la croissance d'un corps est si lente que le disque de gaz se dissipe bien avant la formation d'une grosse planète, ne laissant derrière lui qu'un astre « rabougri ». L'apparition de cette seconde génération de planètes géantes dans notre système aurait d'ailleurs pu avoir un effet dévastateur. En effet, si deux de ces planètes avaient été formées trop près l'une de l'autre, elles auraient pu interagir si fortement qu'elles auraient été catapultées sur des orbites fortement excentriques et inclinées, semant la perturbation dans tout le système. La Terre aurait pu être chassée de son emplacement par le passage proche d'une telle géante. C'est probablement ce qui s'est passé autour des étoiles accompagnées d'un cortège de planètes aux orbites excentriques et inclinées, alors que toutes les planètes du système solaire parcourent des orbites circulaires dans le plan de l'équateur du Soleil.

En fait, Jupiter a déterminé l'évolution de l'ensemble du système par le jeu des résonances entre planétésimaux. Plus proche du Soleil, plus éloigné ou placé sur une orbite elliptique, il aurait perturbé l'accrétion de ces corps, empêchant la formation des planètes telluriques.

Un scénario consensuel

Pour résumer l'histoire de nos origines, la majorité des scientifiques s'accorde aujourd'hui sur le scénario suivant. D'abord les planètes géantes se sont formées dans les parties extérieures de la nébuleuse protosolaire, par capture de gaz d'hydrogène et d'hélium sur un noyau massif résultant de l'accumulation de planétésimaux solides. Puis les planètes telluriques sont apparues, par accrétion de planétésimaux dans les parties intérieures de la nébuleuse. Tout cela n'a duré que quelques dizaines de millions d'années, ce qui est très court à l'échelle astronomique. Les planétésimaux non utilisés pour former les planètes ont interagi avec ces dernières, et une **ceinture d'astéroïdes** beaucoup plus massive que celle qui existe aujourd'hui est apparue entre Mars (dernière planète tellurique) et Jupiter (première planète géante), ainsi que de nombreux corps exilés au-delà de Neptune. Après toutes ces perturbations, un calme relatif s'est établi pendant environ 600 millions d'années. L'étude des cratères des satellites du système solaire indique pourtant qu'un bombardement intense s'est produit environ 800 millions d'années après la formation des planètes. Que s'est-il passé ? Il semble bien que les planètes géantes étaient initialement deux à trois fois plus proches du Soleil qu'aujourd'hui. Leurs **interactions gravitationnelles** les ont conduites à ce moment-là à s'éloigner du Soleil et à migrer vers l'extérieur. L'arrivée des planètes géantes aux confins du système solaire a provoqué un énorme chaos et une foule d'astéroïdes a envahi tout le système, bombardant planètes et satellites pendant une dizaine de millions d'années. Le taux de bombardement était alors environ vingt mille fois supérieur à aujourd'hui. La Terre recevait l'impact d'un objet d'un kilomètre tous les vingt ans ! C'est à ce moment-là que se sont formées les **ceintures** des astéroïdes et **de Kuiper**, que

(1) Astéroïdes troyens : astéroïdes partageant l'orbite de Jupiter autour du Soleil et situés autour de deux points d'équilibre stables. Ils sont répartis en deux groupes, l'un en avance de 60° et l'autre en retard de 60° sur Jupiter.



NASA/JPL

Les anneaux de Saturne vus en **rayonnements radio**. Les similarités entre les anneaux et les disques proto-planétaires sont mises à profit par les scientifiques qui observent en direct des processus ayant permis la formation des planètes.

Jupiter a capté ses astéroïdes troyens[1] et que les planètes géantes ont acquis leurs satellites irréguliers. Dès lors, tout était en place. Environ 800 millions d'années après sa naissance, le système solaire était proche de son état actuel et stabilisé. Depuis, l'évolution s'est faite très lentement. Finalement, il a fallu beaucoup de hasards pour que notre système devienne ce qu'il est aujourd'hui et pour que nous soyons là pour commenter son origine. Si la répartition du gaz dans le disque autour du proto-Soleil avait été un tant soit peu différente, le résultat final aurait été tout autre.

Les enseignements de Saturne

Est-ce à dire que nous savons désormais tout de notre histoire ? Certainement pas. Malgré les spectaculaires progrès récents, nombre de points restent encore à élucider. La durée de certaines étapes et les échelles de temps de plusieurs phénomènes sont encore l'objet de discussions. La fragmentation d'un nuage est encore mal comprise. Le collage entre des agrégats de particules reste bien mystérieux. Comme indiqué plus haut, les scientifiques tournent maintenant leur regard vers Saturne, grâce à la sonde Cassini. Les anneaux de cette géante ont en effet souvent été considérés comme un « laboratoire » caractéristique du disque de gaz et de poussières qui entourait le Soleil avant la formation des planètes (voir *Les anneaux de Saturne : un merveilleux laboratoire d'étude*, p. 40).

Loin d'être uniformes, les anneaux sont en fait constitués de milliers d'annelets aux bords parfaitement délimités. Ils hébergent aussi des arcs de matière découverts pour la première fois autour de Neptune en 1984 par l'auteur de ces lignes. Tout cela suggère fortement l'existence de mécanismes de confinement, sujet majeur d'études dans de nombreux domaines de la physique. Les collisions entre les particules, les interactions gravitationnelles entre des anneaux minces et des petits satellites, ainsi que les phénomènes de résonance, conduisent à un échange d'énergie et de **moment cinétique** tel qu'anneaux et satellites se repoussent mutuellement. C'est ainsi que deux petits satellites, appelés « satellites gardiens », peuvent confiner un petit anneau. Les astronomes se demandent actuellement si des mécanismes de ce type entre les premiers embryons de planètes formés et de plus petites particules n'ont pas joué un rôle important pour former des planètes telluriques. Si Jupiter a indiscutablement déterminé l'existence même de la Terre, c'est maintenant Saturne, autre géante gazeuse, qui nous renseignera peut-être sur la formation de notre propre planète.

> André Brahic
Université Paris 7
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7- CNRS)
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)

Les anneaux de Saturne : un merveilleux laboratoire d'étude

Les anneaux de Saturne, aussi **brillants** que la **planète** elle-même, fascinent les hommes depuis des siècles. Galilée les remarque le premier, en 1610, avec la lunette qui lui a permis l'année précédente d'observer les cratères de la Lune et les satellites de Jupiter. En raison de la mauvaise qualité optique de l'instrument, il voit des sortes de taches lumineuses de part et d'autre de la planète. C'est l'astronome hollandais Christiaan Huygens qui, en 1655, comprend que des anneaux entourent Saturne. Aujourd'hui, après l'émerveillement, vient l'étude. La mission Cassini, dans laquelle le CEA est très impliqué grâce à l'accès à deux instruments embarqués – les caméras ISS et le spectromètre infrarouge CIRS –, les scrute régulièrement sous différents angles de vue, à l'échelle de quelques heures, quelques mois ou plusieurs années, pour suivre les effets saisonniers. L'instrument CIRS mesure notamment la température des anneaux, qui sont totalement gelés, et étudie avec précision la composition des particules les constituant (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90).

Avec plus de 300 000 km de diamètre pour une dizaine de mètres d'épaisseur (sauf exceptions), ne pesant au total pas plus lourd qu'un satellite de 400 km, constitués de myriades de blocs de glace de l'ordre du mètre, les anneaux forment un monde à part. Un monde en perpétuelle évolution, déformé en permanence par les satellites proches, et à la surface duquel se propagent des **ondes** spirales. C'est aussi une des structures les plus évoluées de l'Univers, tout au moins si l'on mesure l'évolution à l'aune du nombre de révolutions – ce qui est appelé le « temps dynamique ». Depuis leur origine, d'ailleurs incertaine, les anneaux ont peut-être fait des centaines de milliards de révolutions sur eux-mêmes alors que **notre Galaxie** n'en a fait que quelques dizaines... Ils tournent en effet sur eux-mêmes en une dizaine d'heures, contre environ 200 millions d'années pour la Galaxie (à la distance du Soleil). Durant ces innombrables révolutions, les moindres perturbations, les structures les plus subtiles ont eu pleinement le temps de se développer, comme une gigantesque broderie **gravitationnelle** de taille planétaire.

NASA/JPL/Space Science Institute

Les images à haute résolution obtenues par la sonde Cassini ont révélé la forme étonnante de Pan (à droite) et Atlas (à gauche), deux satellites situés au cœur des anneaux de Saturne. Leurs bourrelets à l'équateur les font ressembler à des soucoupes volantes. Ils se sont constitués par l'accumulation récente de poussières provenant des anneaux.

NASA/JPL/Space Science Institute

La face obscure des anneaux. Dans cette image, les anneaux de Saturne sont observés du côté opposé au Soleil. Dans cette géométrie d'observation très inhabituelle, les anneaux denses sont très sombres (l'anneau B en particulier) et les anneaux peu denses scintillent faiblement (anneaux C et A). L'ombre projetée des anneaux sur la planète est visible.

Outre leur intérêt propre, les anneaux intéressent les scientifiques par leurs similarités avec d'autres disques de plus grandes dimensions (voir *Les cocons des planètes*, p. 41). En effet, à l'instar des **disques d'accrétion** autour d'**étoiles**, des **trous noirs** ou des disques proto-planétaires, leur évolution est dictée par l'étalement visqueux. Comme pour les **galaxies spirales** ou les disques d'accrétion, par exemple, leur aplatissement provient de processus dissipant l'énergie. Ils sont gravitationnellement instables, ce qui les rapproche à nouveau des galaxies spirales. Enfin, la région de leur bord externe est le siège de processus d'**accrétion** évoquant les disques proto-planétaires au sein desquels se forment des planètes.

Observer la naissance des planètes

Les anneaux de Saturne présentent cependant des caractéristiques propres qui les distinguent de tous les autres disques astrophysiques. Par exemple, ils sont pour une grande part situés dans une zone particulière autour de Saturne, appelée le **lobe de Roche**. Ceci a retardé les processus d'accrétion, à cause des **effets de marée**. Conséquence heureuse de ce retard, les astronomes sont aujourd'hui aux premières loges pour étudier *de visu* comment la matière s'assemble pour donner naissance à des satellites, version « miniaturisée » de la formation des planètes.

En couplant observation et **simulations numériques**, les équipes du CEA ont étudié en particulier comment le matériau se structure et s'accrète au bord externe des anneaux et, en s'inspirant de **modèles** de formation planétaire, ont pu expliquer la forme des petits satellites Pan et Atlas (environ 30 km de rayon), tous deux situés dans l'anneau A[1]. Ceci a permis aussi de montrer comment des structures spirales se forment autour de l'anneau F, à cause de processus collisionnels qui évoquent les disques circumstellaires. Enfin les observations de CIRS ont révélé la présence de structures gravitationnelles qui ne sont autres que des **ondes de Jeans-Toomree**, rencontrées, là encore, à l'origine de la formation des planètes.

(1) Du centre à la périphérie, les anneaux sont identifiés ainsi : D, C, B, A, F, G et E. La série interne (D à A) rassemble les anneaux denses, brillants, visibles depuis la Terre. La série externe (de E à F), découverte durant les dernières décennies du 20e siècle par les sondes Pioneer et Voyager, rassemble des anneaux beaucoup moins denses.

> **Sébastien Charnoz** et **Cécile Ferrari**
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles
(CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Les cocons des planètes

Les étoiles jeunes sont entourées d'un disque de gaz et de poussière dans lequel se forment les planètes. Les astrophysiciens traquent et explorent ces disques « proto-planétaires » afin de comprendre la genèse des planètes. L'observation des disques plus ténus entourant de vieilles étoiles permet de révéler indirectement la présence d'exoplanètes.

ESO

Vue d'artiste d'un disque proto-planétaire évasé.

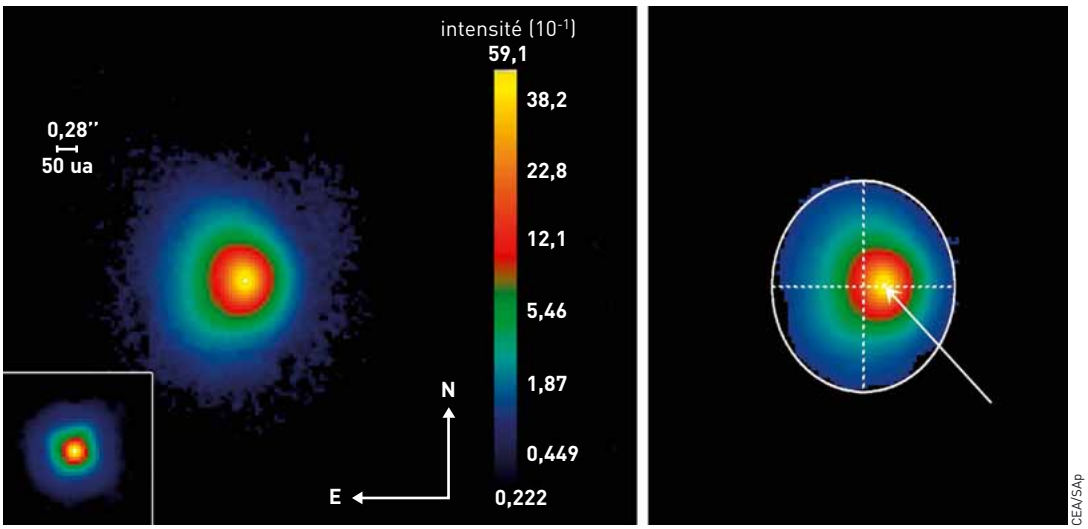
Depuis 1995, date de la découverte de la première d'entre elles, la recherche de planètes extra-solaires a été très fructueuse. À ce jour, les astronomes en comptent plus de 350 à leur tableau de chasse. Les « exoplanètes » – comme d'ailleurs les **planètes** du système solaire – se sont très probablement formées dans les disques de gaz et de poussière entourant les **étoiles** jeunes. Ces disques jouent un double rôle dans les scénarios actuels de formation des planètes : ils apportent la matière qui les constitue, et ils influencent également leur orbite. Il est donc essentiel de bien les connaître (taille, géométrie, masse, densité…) pour en savoir plus sur la genèse des planètes.

Une géométrie inattendue

L'observation des disques n'est pas une mince affaire. La présence d'un disque autour d'une étoile a, tout d'abord, été inférée à partir de la lumière émise par le système étoile-disque. En effet, les poussières **absorbent** la lumière de l'astre (essentiellement de la **lumière visible**), chauffent et réémettent cette énergie sous forme de **rayonnement infrarouge**. À l'observation, un couple étoile-disque se signale donc par un excès d'émission infrarouge par rapport à une étoile seule. Faire une image d'un disque est beaucoup plus difficile et très peu de disques ont été **résolus spatialement** et cartographiés. Un des rares à l'avoir été entoure l'étoile HD97048, située dans la constellation du Caméléon (hémisphère Sud) à une distance de 600 **années-lumière** de la Terre. Deux fois et demie plus massive que le **Soleil** et quarante fois plus **lumineuse**, HD97048 est encore très jeune : seulement 3 millions d'années, soit moins d'un millième de l'âge du Soleil. Elle a été observée en 2006 avec l'instrument infrarouge VISIR du VLT (*Very Large Telescope*), construit par le CEA/Irfu pour l'**ESO** (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90).
VISIR a démontré l'existence d'un disque s'étendant, à partir de l'étoile, sur plus de 370 fois la distance entre la Terre et le Soleil, soit 370 **unités astronomiques** (**ua**). Les images ont révélé une morphologie bien particulière : le disque n'est pas plat mais s'évase régulièrement vers l'extérieur (figure 1). À sa périphérie, soit à 370 ua de son étoile, il atteint une épaisseur de 360 ua. C'est la première fois qu'une telle structure, prédite par certains **modèles**, est directement mise en évidence autour d'une étoile aussi massive. Une telle géométrie ne peut s'expliquer que si le disque contient encore beaucoup de gaz, dont la masse a été estimée à au moins 10 fois la masse de Jupiter, soit environ $1{,}9 \cdot 10^{28}$ kg. La grande quantité de poussière qu'il comporte – plus de 50 fois la masse de la Terre, soit près de $3 \cdot 10^{26}$ kg – constitue un autre indice de sa jeunesse. Selon toute probabilité, les astronomes ont sous les yeux un disque similaire à la nébuleuse **primordiale** autour du Soleil dans laquelle sont nées les planètes de notre système, donc la Terre.

La migration des planètes

Bien avant la détection de la première planète extra-solaire, les théoriciens n'étaient pas sans ignorer que les planètes en formation dans les disques étaient



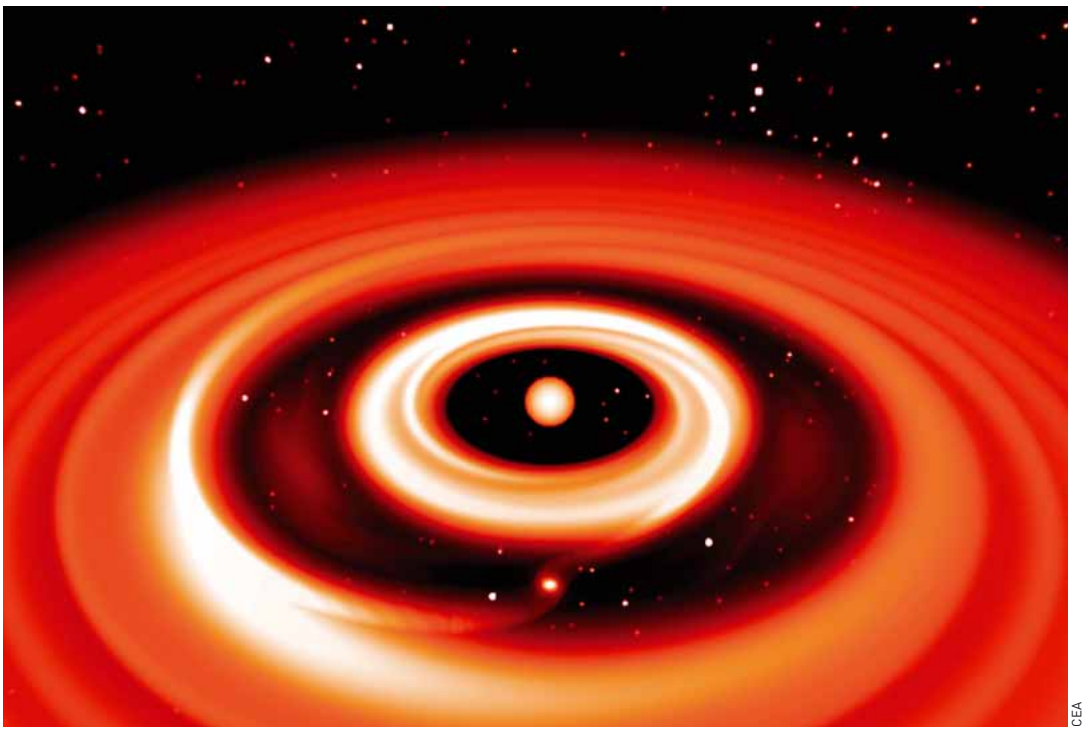
CEA/SAp

Figure 1. À gauche, image en fausses couleurs (variant du bleu au jaune en fonction de l'intensité) de l'émission infrarouge à la longueur d'onde de 8,6 µm de la matière entourant l'étoile HD97048. Cette émission est beaucoup plus étendue que celle d'une étoile sans disque, représentée dans l'encadré en bas à gauche. À droite, le centre de contour de l'émission infrarouge (en forme d'ellipse) est nettement décalé par rapport à la position de l'étoile (marquée par une flèche), indiquant que cette structure est un disque incliné.

extrêmement mobiles, c'est-à-dire que leur rayon orbital pouvait varier de manière considérable, par suite des **effets de marée** avec le disque. Ils savaient également que ces effets de marée avaient tendance à amener les planètes en formation au voisinage de leur étoile centrale, leur faisant ainsi décrire une trajectoire spirale. Toutefois, ces travaux étaient restés assez confidentiels, aussi ce fut une surprise extraordinaire de constater que 51 Peg b, la première planète extrasolaire découverte, décrivait en 4,23 jours une orbite de seulement 0,052 ua de rayon autour de son étoile centrale ! À titre de comparaison, Mercure, la planète la plus proche du Soleil, décrit son orbite en 88 jours, à 0,39 ua de ce dernier. Depuis lors, les travaux des théoriciens sur les interactions de marée entre disques proto-planétaires et planètes en formation se sont retrouvés à l'avant-scène des scénarios de formation planétaire. Il n'existe en effet aucun mécanisme viable de formation *in situ* de planètes géantes aussi près de leur étoile. La communauté des astrophysiciens s'accorde donc à penser que ces objets se créent beaucoup plus loin de l'astre central, dans les régions du disque suffisamment froides pour permettre la condensation des glaces d'eau, puis sont amenés au voisinage de leur étoile par effet de marée. Ce processus s'appelle la *migration planétaire*. C'est un mécanisme essentiel pour la formation des systèmes planétaires : sa compréhension en profondeur est donc cruciale.

Des itinéraires variés

Depuis 1995, les théories de migration planétaire ont énormément progressé. Initialement cantonnées aux études analytiques, elles ont beaucoup bénéficié de l'avènement de calculateurs suffisamment puissants pour prédire finement la réponse du disque au cours des nombreuses orbites que décrit une proto-planète. À l'heure actuelle, il existe différents modes de migration d'une planète dans un disque. La *migration de type I* correspond à la



CEA

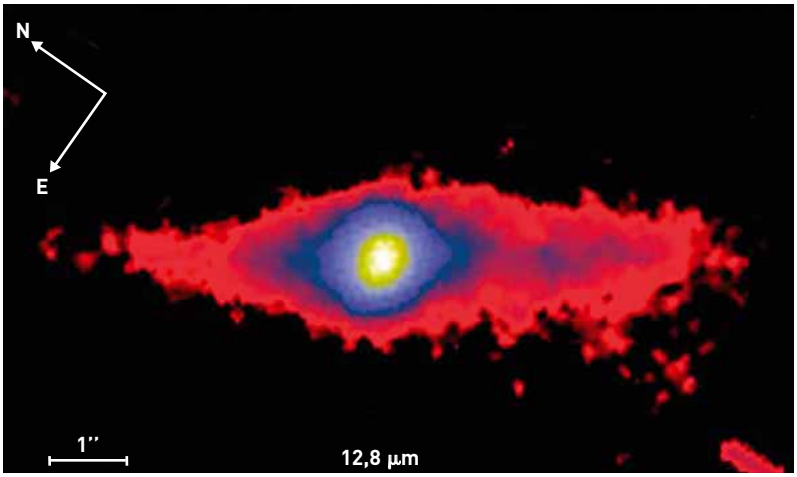
Figure 2. Résultat d'une **simulation** de l'interaction d'une proto-planète géante (d'une masse de Jupiter) et d'un disque proto-planétaire. Un sillon (l'anneau sombre, au travers duquel on voit les étoiles d'arrière-plan) a été évidé dans le disque par la planète. Celle-ci excite également dans le disque un sillage spiral, par effet de marée. C'est la force exercée par ce sillage qui fait migrer la planète.

dérive rapide, vers le centre, des planètes de petite masse – typiquement la masse terrestre. Les planètes géantes, en revanche, évident leur orbite où elles creusent un sillon par effet de marée (figure 2). Il en résulte une *migration de type II*, beaucoup plus lente. Les disques proto-planétaires **turbulents** engendrent des migrations fort différentes : les fluctuations de densité résultant de la turbulence tendent à induire une marche au hasard du demi-grand axe[1] des planètes de petite masse. C'est la *migration « stochastique »* ou *« diffusive »*. Son étude est particulièrement importante car les astrophysiciens s'attendent à ce que les disques proto-planétaires soient turbulents sur une grande part de leur rayon. Il existe également des modes de migration plus exotiques, comme la *migration « emballée »* (*ou de type III*) des planètes « sous-géantes », ou la *migration « de concert »*, vers l'extérieur, de planètes géantes en résonance[2]. Le Service d'astrophysique du CEA/Irfu, très impliqué dans l'étude de la migration planétaire, a effectué plusieurs découvertes de premier plan. Reste toutefois une question essentielle : qu'est-ce qui arrête la migration planétaire ? À quoi on peut en ajouter une autre : pourquoi les planètes de notre système solaire semblent-elles n'avoir pas migré ?

Des débris bien utiles

Le disque autour des étoiles jeunes a tendance à disparaître sur une échelle de temps d'environ dix millions d'années. En effet, une partie de la matière se retrouve dans les planètes, une autre est « soufflée » au loin par la pression de la lumière émise par l'étoile, une troisième tombe en spirale jusqu'à l'astre central. Si bien que les étoiles d'âge mûr devraient être dépourvues de disque, et seule la lumière émise par l'étoile devrait être observée. Et pourtant, lorsqu'en 1984 le premier satellite infrarouge américain IRAS (*InfraRed Astronomical Satellite*) a observé des étoiles comme Vega ou β-Pictoris à des fins de calibration, il a détecté un excès de lumière infrarouge. Comment expliquer un tel phénomène ? Y aurait-il encore des poussières autour de ces étoiles ? Eh bien oui, comme l'ont très vite confirmé des observations dans le visible de l'étoile β-Pictoris, qui ont révélé la présence d'un disque résolu autour de l'étoile[3].

Comment réconcilier cette observation avec les théories qui prédisaient l'absence de poussière ? Les quantités de poussière en jeu sont très faibles, bien plus faibles que celles contenues dans les disques proto-planétaires. Ce ne sont d'ailleurs pas des poussières primaires : elles ont été « stockées » dans des corps célestes comme des **comètes** ou des **astéroïdes**, puis régénérées lors de l'évaporation de ces comètes passant auprès de leur étoile, ou lors de collisions entre astéroïdes. De tels phénomènes existent d'ailleurs dans le système solaire, et les poussières ainsi créées engendrent la lumière « zodiacale »[4].



CEA-ESO

Figure 3.
Image du disque de débris autour de l'étoile β-Pictoris, observé avec l'instrument VISIR du VLT. On peut notamment remarquer la dissymétrie du disque.

Ces disques de « débris » intéressent les astronomes car une planète peut y « sculpter » des sillons, nettement plus faciles à observer que la planète elle-même. En 1994, le Service d'astrophysique a obtenu les premières images des régions centrales du disque autour de l'étoile β-Pictoris. Celles-ci ont révélé une morphologie laissant supposer la présence d'une planète dans le système (figure 3). Récemment, une équipe du **Laboratoire d'astrophysique** de l'**Observatoire des sciences de l'Univers de Grenoble** a montré qu'il y a au moins une planète dans ce disque. S'ils ne sont pas le cocon où se forment les exoplanètes, les disques de « débris » constituent donc au moins une aide précieuse pour les repérer.

L'étude des disques, structures relativement ténues, repose sur le pouvoir de résolution du télescope, c'est-à-dire la finesse des détails qui peuvent être observés. Or, cette résolution dépend directement du diamètre du miroir. En effet, étant donné le phénomène de diffraction de la lumière, l'image d'un objet ponctuel à travers un télescope n'est pas un point, mais une tache : la tache de diffraction. Plus grand est le diamètre du télescope, plus petite sera cette tache. L'image d'une étoile à travers l'E-ELT (*European-Extremely Large Telescope ;* voir *ELT/METIS, un géant de 42 mètres*, p. 110), télescope européen de 42 mètres de diamètre qui entrera en service en 2018, aura ainsi une surface 25 fois moindre que celle des images produites par le VLT. Ce sera donc un instrument extraordinaire pour l'étude des disques !

> Pierre-Olivier Lagage, Frédéric Masset et **Éric Pantin**
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

(1) Demi-grand axe : segment (imaginaire) qui joint le centre d'une ellipse au bord en passant par un des foyers.

(2) Une résonance a lieu lorsque deux objets orbitant autour d'un troisième ont des périodes de révolution dont le rapport forme une fraction entière simple (par exemple 2/3 pour Neptune et Pluton autour du Soleil).

(3) Cette lumière visible provient de l'étoile et est simplement diffusée par les poussières, contrairement à la lumière infrarouge qui est émise par ces poussières elles-mêmes.

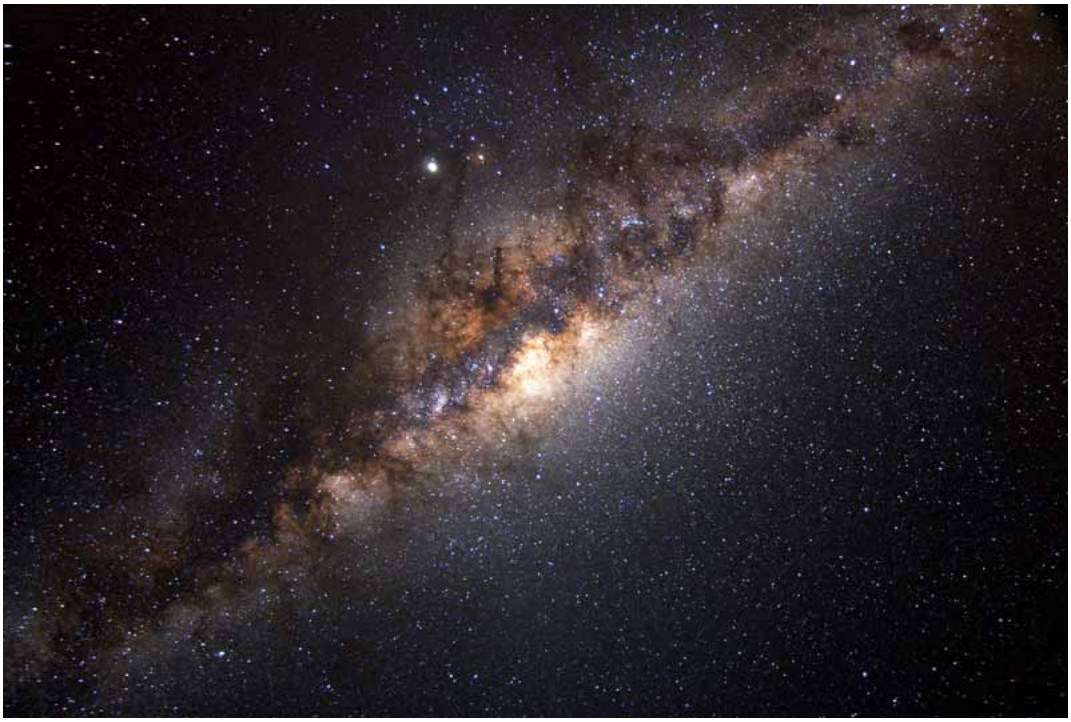
(4) Lumière zodiacale : faible lueur visible dans le ciel nocturne, s'étendant le long du plan de l'écliptique à partir des environs du Soleil, peu après le coucher ou avant le lever de celui-ci.

Notre Galaxie, la Voie lactée, a la forme d'une belle spirale bien dessinée. Ce disque en rotation composé de gaz et de plus de deux cents milliards d'étoiles est en effet parcouru, très lentement, par des ondulations où se concentrent les étoiles les plus jeunes et les plus lumineuses, qui matérialisent ainsi la forme visible des bras spiraux. Au centre, un bulbe sphérique au cœur duquel se tapit un trou noir supermassif. Le tout s'entoure d'un vaste halo de matière noire. Toutes les galaxies de l'Univers ne suivent pas un modèle aussi ordonné. Certaines, dites elliptiques, adoptent une forme plus sphérique et comprennent essentiellement de vieilles étoiles aux trajectoires chaotiques. Comment se sont formées ces deux populations ? Pour retracer l'évolution des galaxies, les astrophysiciens traquent les objets les plus anciens de l'Univers. Entre évolution spontanée pour les galaxies spirales et succession de collisions pour les elliptiques, des scénarios se dessinent. De nombreux paradoxes et mystères demeurent cependant : l'histoire des galaxies n'est pas encore écrite.

Les **galaxies** : une **évolution** pleine de **paradoxes**

La vie des galaxies actives

Comme toutes les galaxies spirales, notre Voie lactée est active : de nouvelles étoiles y naissent encore aujourd'hui. Même si elles ne représentent pas, et de loin, la totalité de la matière d'une galaxie, les étoiles en constituent le principal « moteur ».



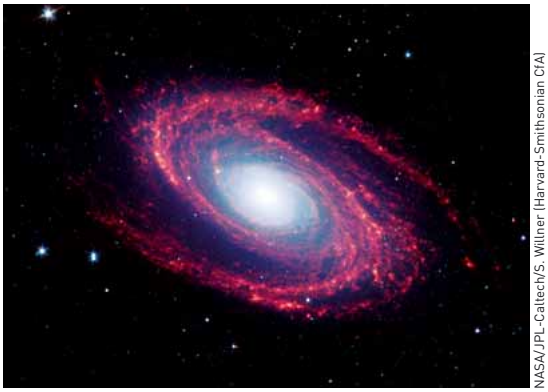
Serge Brunier

Les êtres humains ont toujours été fascinés par les étoiles et les phénomènes célestes. Notre Galaxie, la Voie lactée, est un disque de plus de deux cents milliards d'étoiles. L'Univers contient des centaines de milliards d'autres galaxies où naissent les étoiles à un rythme plus ou moins élevé.

L'observateur du ciel nocturne connaît bien la **Voie lactée**, cette bande luminescente qui parcourt la voûte céleste. Notre Galaxie nous apparaît ainsi puisque c'est un disque vu de l'intérieur. Les astronomes en savent aujourd'hui beaucoup plus sur sa forme réelle. Sa composante stellaire[1] s'étend sur environ 100 000 **années-lumière** de diamètre. Les plus récentes mesures situent le système solaire à 26 000 années-lumière du centre, endroit où la Galaxie a une épaisseur de l'ordre de 2 500 années-lumière.

(1) La partie visible comprenant les étoiles.

NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)



NASA/JPL-Caltech/S. Willner (Harvard-Smithsonian CfA)

Figure 1.
À gauche, image en lumière visible, prise par le télescope spatial Hubble, de la galaxie spirale M81, située à 12 millions d'années-lumière de la Voie lactée. Le disque stellaire diffus apparaît en jaune, les bras spiraux constitués d'étoiles jeunes en bleu. À droite, ces bras révèlent, sur l'image en infrarouge obtenue avec le télescope spatial Spitzer, des régions actives (nuages) de formation stellaire. Les étoiles elles-mêmes, émettant peu en infrarouge, ont pratiquement disparu de l'image, sauf dans les régions centrales où leur densité est très élevée.

Il s'agit d'une **galaxie spirale**, c'est-à-dire que le gaz qui la compose n'est pas réparti uniformément dans le disque mais dessine plusieurs bras spiraux s'enroulant autour du centre (figure 1). En fait, cette apparence est un leurre. En effet, ces bras sont des structures transitoires, matérialisant dans le disque la propagation de zones de compression dues à la rotation différentielle des **étoiles** et du gaz autour du centre galactique[2]. Ces **ondes** de densité balayent notre Galaxie comme la houle traverse l'océan. Au maximum de densité – à la « crête » de la houle – le gaz se transforme en étoiles, créant ainsi la structure observable qui fait de la Galaxie une « spirale ».
La « faune » galactique se répartit en trois grandes catégories : les **galaxies elliptiques**, spirales, et irrégulières ou naines. Ces morphologies traduisent des différences fondamentales dans l'histoire des galaxies. Par exemple, la majeure partie des étoiles peuplant les galaxies elliptiques sont apparues il y a une dizaine de milliards d'années, alors que dans les galaxies spirales les astres continuent à se former aujourd'hui. Ainsi la Voie lactée contient-elle à la fois des **amas d'étoiles** dont l'âge est comparable à celui de l'Univers et d'autres encore en gestation. Le cœur de la Galaxie est particulièrement intéressant du point de vue de la formation des étoiles. En effet, par le jeu de la **gravitation** et de la dynamique galactique, c'est là que se concentrent de grandes quantités de gaz, de formidables forces de compression et un **trou noir** supermassif, le tout donnant naissance à la région la plus active de la Voie lactée, souvent prise comme modèle pour l'étude de galaxies actives distantes (voir *Un trou noir mystérieux*, p. 48).

Les étoiles...

Mais qu'y a-t-il dans une galaxie ? D'abord des étoiles, bien sûr. Un observateur entraîné peut en distinguer quelque 4 000 à l'œil nu, mais notre Galaxie en contient environ 200 milliards. Leur masse détermine la plupart de leurs caractéristiques : **luminosité**, couleur, durée de vie… (voir *Voyage dans les nurseries stellaires*, p. 17). Par exemple, la présence d'**étoiles** bleues, donc **massives** et de courte durée de vie, dans une région donnée, indique une formation d'étoiles récente, comme dans l'amas des Pléiades, connu des astronomes amateurs.
Les étoiles de notre Galaxie furent historiquement classées en deux populations caractérisées par leurs âge, composition chimique et trajectoire. La *population I* regroupe les étoiles qui suivent la rotation du disque, en particulier des objets jeunes, riches en **éléments lourds**. Ce sont eux qui affectent la physique du **milieu interstellaire**. La *population II* rassemble de vieilles étoiles, contenant peu d'éléments lourds, souvent regroupées en **amas globulaires**, distribuées dans le **halo** et parcourant des trajectoires chaotiques. Elles constituent les vestiges de la première vague de formation d'étoiles de la Galaxie, lorsque celle-ci n'était encore qu'une sphère de gaz en contraction. À l'opposé, la *population I* est constituée des étoiles créées après le disque.

... et le reste

Les étoiles constituent de loin la composante la plus importante d'une galaxie en termes de puissance rayonnée, mais pas la seule. Ces concentrations très compactes de matière sont en effet très éloignées les unes des autres. Le milieu interstellaire occupe donc l'essentiel du volume Galactique. Et pourtant, avec

phase du milieu interstellaire	densité (cm^{-3})	température (K)	fraction du volume (%)
milieu inter-nuage chaud	0,003	1 million	50
milieu neutre tiède	0,5	8 000	30
milieu ionisé tiède	0,1	8 000	25
milieu neutre froid	50	80	1
nuages moléculaires	> 200	10	0,05
régions HII	de 1 à 100 000	10 000	> 0,05

Tableau.
Les différentes phases du milieu interstellaire et leurs propriétés caractéristiques.
Les nuages interstellaires des régions HII sont principalement composés d'hydrogène dont la plupart des atomes sont ionisés par le **rayonnement ultraviolet** d'étoiles de **type spectral** O et B, tandis que ceux des régions HI sont constitués d'hydrogène atomique neutre.

(2) À titre d'exemple, à la position du Soleil (26 000 années-lumière du centre), la vitesse de rotation du disque est de l'ordre de 200 km par seconde. Notre système solaire effectue un tour de Galaxie en 250 millions d'années.

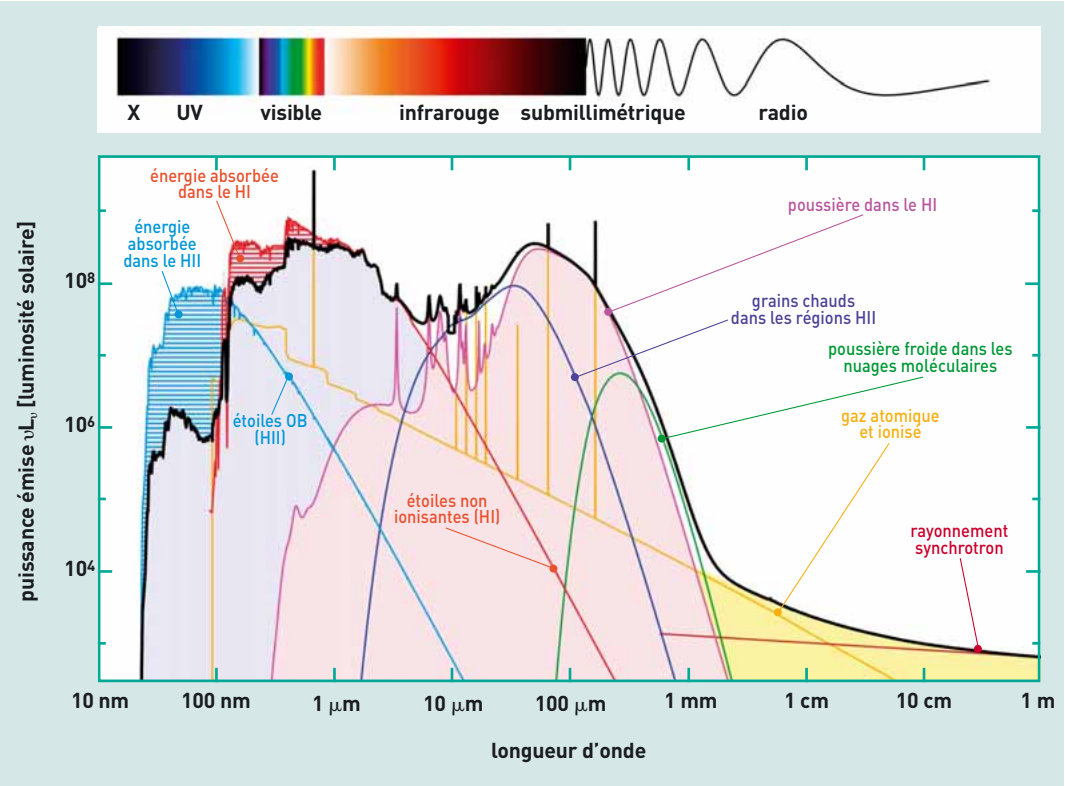


Figure 2.
Spectre électromagnétique d'une galaxie (en noir), résultant de l'émission : des étoiles les plus massives (en bleu) ; du gaz des régions qu'elles ionisent (en jaune) et de la poussière mêlée à ce gaz (en violet) ; des autres étoiles (en rouge) et de la poussière interstellaire chauffée par ce rayonnement (en mauve) ; de la poussière dans les nuages les plus denses (en vert) et du rayonnement des particules chargées dans le **champ magnétique** (en bordeaux). Les zones hachurées correspondent à la fraction de l'émission absorbée *in situ* pour produire les émissions interstellaires. Chaque motif (raies, bandes d'émission, brisures du continuum) de ce spectre renseigne sur la physique des galaxies.

une densité moyenne de seulement un **atome** pour 3 centimètres cubes, il ne représente que 3 % de la masse stellaire[3]. Il est constitué d'atomes neutres ou **ionisés**, de **molécules** et de particules solides de quelques dixièmes de **microns**, voire moins : les grains de poussière. En fait, loin d'être homogène, le milieu interstellaire comporte différentes régions de densités et températures variées (tableau). Malgré sa faible masse, le milieu interstellaire joue un rôle capital dans l'équilibre énergétique de la Galaxie, puisqu'il **absorbe** environ un tiers de la puissance stellaire et la réémet à des longueurs d'onde supérieures – donc à moindre énergie. Dans certaines galaxies, dites « à flambée de formation d'étoiles », cette fraction peut atteindre 99 %.

(3) Cette densité représente un vide extrême comparé à notre atmosphère, qui comporte 10^{22} atomes par centimètre cube.

L'interaction entre le rayonnement stellaire et le milieu interstellaire, phénomène très complexe, recèle une grande richesse d'informations (figure 2). Grâce aux spectres galactiques, les astrophysiciens peuvent appréhender à distance la composition et l'état physique de différentes régions galactiques. La forme de l'**émission continue** des grains indique ainsi leur abondance et l'intensité du rayonnement stellaire qu'ils subissent, alors que les **raies émises** par les atomes et molécules dénotent la composition de la phase gazeuse, sa densité et sa température.

Finalement, cet inventaire ne serait pas complet sans la mention d'une composante encore incomprise à l'heure actuelle : la **matière noire**. Elle représente probablement 70 % de la masse totale mais n'émet aucun **rayonnement électromagnétique** et ne se manifeste que par sa **gravité**. Historiquement, elle a d'ailleurs été révélée indirectement par son effet sur la rotation des galaxies. Sa présence n'affecte pas la microphysique du milieu interstellaire. En revanche, elle est capitale pour comprendre la formation des galaxies et leur dynamique (voir *Formation des galaxies : une histoire paradoxale*, p. 56 et *La morphogenèse des galaxies*, p. 60).

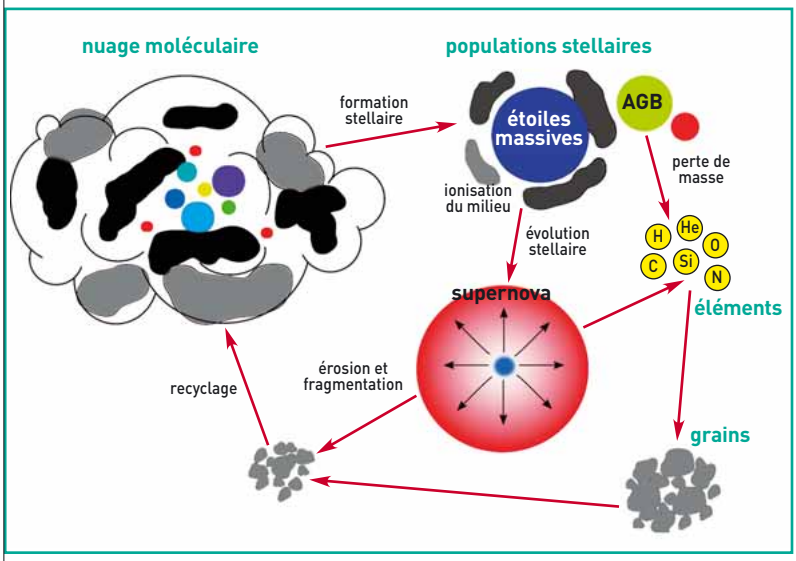


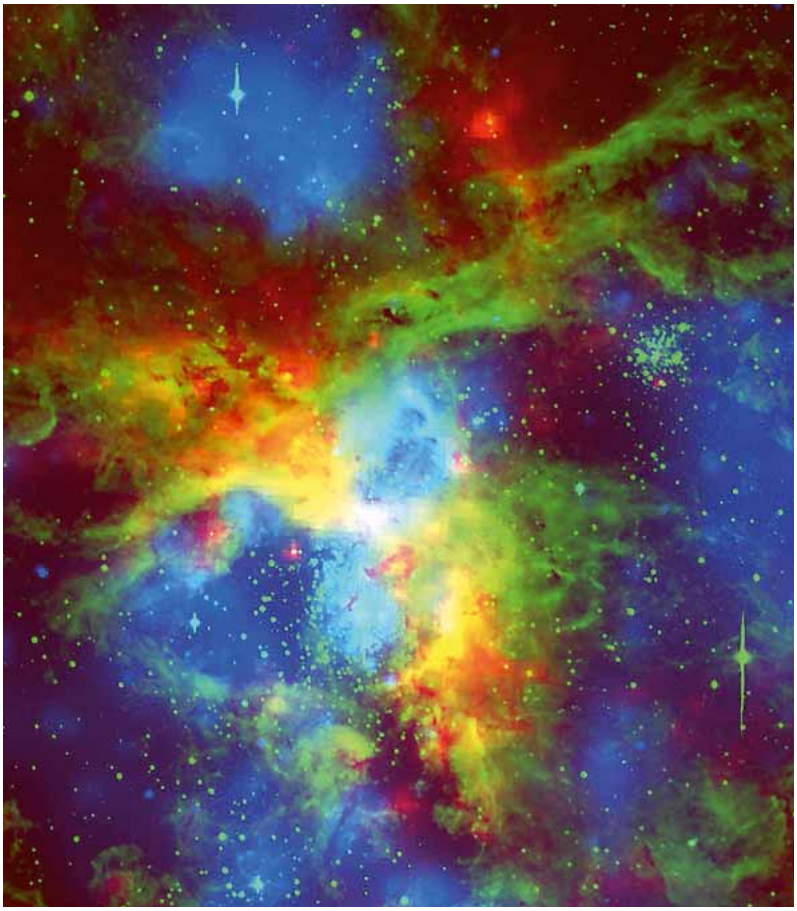
Figure 3.
Le cycle de l'évolution stellaire et son effet sur la composition des galaxies. La formation et l'évolution des étoiles contribuent à modifier, non seulement la composition chimique des galaxies, mais aussi leur contenu énergétique. La population stellaire AGB correspond aux étoiles de faible masse, dans leur phase de **géante**.

Les étoiles, moteurs des galaxies

Tout comme les étoiles, et d'ailleurs principalement sous leur influence, les galaxies évoluent sur des échelles de temps de l'ordre de quelques dizaines de millions d'années. Chacune des étapes de la vie des étoiles affecte la galaxie (figure 3). Elles naissent au sein de nuages moléculaires denses, par effondrement

gravitationnel et fragmentation (voir *Voyage dans les nurseries stellaires*, p. 17). Des molécules s'accumulent à la surface des grains. La gestation des étoiles participe ainsi à la naissance des composés les plus complexes du milieu interstellaire. En retour, ces composés prennent part à la formation des astres. Les conditions physiques particulières de ces régions – faible température et forte densité – engendrent une émission spectrale originale : de nombreuses raies moléculaires et un rayonnement continu aux grandes longueurs d'onde (dans l'**infrarouge** et le **submillimétrique**), là où le milieu interstellaire est relativement transparent. Il faut noter que l'**hydrogène** moléculaire froid, qui n'émet pratiquement aucun rayonnement détectable, constitue l'essentiel de la masse considérée. Les observations doivent donc cibler des constituants (poussières et molécules) présents à l'état de traces, afin d'extrapoler les propriétés d'ensemble.

Puis, durant la seconde étape de leur vie, les étoiles massives injectent de l'énergie dans la galaxie. Pendant quelques millions d'années, ces objets ne rejettent que peu de matière mais façonnent dramatiquement le milieu alentour. Le rayonnement stellaire dissocie les molécules, ionise les atomes et **sublime** les glaces accumulées à la surface des grains. Ces régions sont parmi les plus lumineuses et les plus spectaculaires des galaxies, du fait des formes fascinantes créées par l'interaction du rayonnement et du **vent stellaire** avec le milieu environnant (figure 4). Leur observation est donc relativement aisée, et la mesure de la quantité d'énergie stellaire injectée, par exemple *via* le rayonnement de recombinaison de l'hydrogène, sert à quantifier le taux de formation d'étoiles. Ces mesures ne sont toutefois pas exemptes d'incertitude car la composition chimique des galaxies influence la luminosité des étoiles et l'**opacité** du milieu interstellaire. Cette injection de grandes quantités d'énergie dans le milieu interstellaire régule l'évolution galactique. Sans elle, le processus de formation stellaire perdrait l'un de ses principaux freins, et la plupart des galaxies se retrouveraient aujourd'hui peuplées de vieilles étoiles, leur réservoir de gaz s'étant épuisé en quelques millions d'années.



R. Indebetouw *et al.*, *Astrophysical Journal*, vol. 694, issue 1, p. 84-106, 2009

Figure 4.
La région 30 Doradus dans le Grand Nuage de Magellan. Il s'agit d'une région très riche en étoiles massives concentrées en amas (au centre de l'image) qui ont un impact profond sur le milieu environnant. La composante bleue représente l'émission en **rayons X mous** du gaz ionisé diffus et très chaud. La composante verte correspond à la **lumière visible** émise par les étoiles et les parties les plus denses de la nébuleuse. La composante rouge montre l'émission **infrarouge** des poussières.

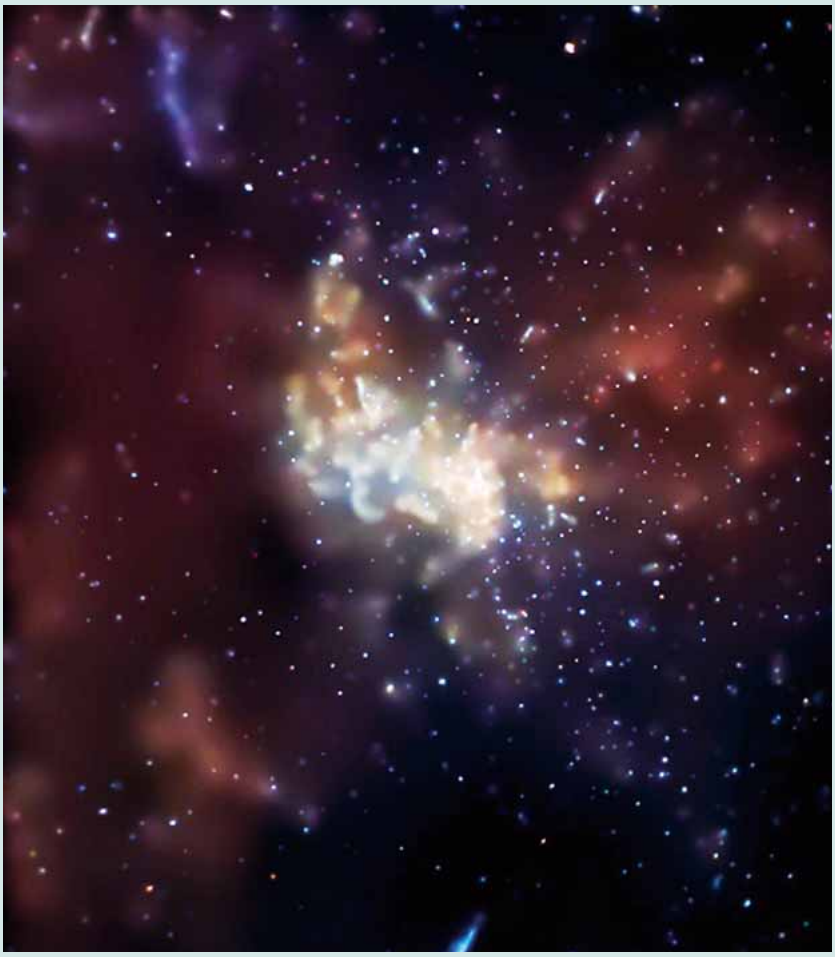
Une mort fertile

La fin de vie explosive des étoiles massives transforme profondément le milieu interstellaire. Cette explosion, appelée **supernova**, disperse la quasi-totalité des éléments lourds fabriqués par l'étoile, ainsi que toute la série des éléments plus lourds que le fer, formés lors de l'explosion (voir *L'explosion des supernovae*, p. 26). Observant les supernovae extragalactiques depuis quelques années, les astrophysiciens commencent à mieux connaître la répartition chimique des éléments qui retournent au milieu interstellaire. Ils peuvent alors, en retour, « lire » dans la composition chimique d'une galaxie l'effet de la formation stellaire au cours de sa vie. L'explosion des supernovae engendre aussi des ondes de choc qui balayent le milieu interstellaire sur des milliers d'années-lumière. Ces chocs ont un effet profond : ils injectent une énergie que le milieu interstellaire devra réévacuer pour amorcer le processus de formation stellaire. Ils fragmentent également les grains de poussière, ce qui modifie leur émission. Enfin, les supernovae représentent un des principaux sites de génération et d'accélération des **rayons cosmiques**, ces **noyaux atomiques** qui voyagent sur des distances parfois plus grandes que les galaxies elles-mêmes et qui, déposant une partie de leur énergie dans les nuages moléculaires, retardent leur effondrement (voir *Élucider le mécanisme d'accélération des rayons cosmiques*, p. 50).

La mort des étoiles moins massives participe aussi au cycle galactique. Celle-ci se caractérise par l'existence de phases durant lesquelles les différentes couches de l'étoile, enrichies en carbone, silicium et oxygène, sont lentement rejetées dans le milieu interstellaire. La température s'abaisse lentement pour atteindre un niveau propice à de nombreuses réactions chimiques et à la formation de poussière interstellaire. Ces étoiles « à enveloppes » constituent le principal site de formation de la poussière interstellaire.

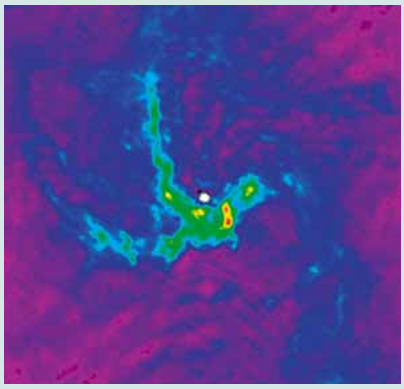
> **Marc Sauvage**[1] et **Frédéric Galliano**[2]
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles (CEA[1]-Université Paris 7- CNRS[2])
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Un trou noir mystérieux



NASA/CXC/MIT/F. K. Baganoff *et al.*

Le centre de notre Galaxie vu par Chandra, le satellite de la NASA dédié à l'observation dans le domaine des rayons X. Au cœur se cache un trou noir géant.



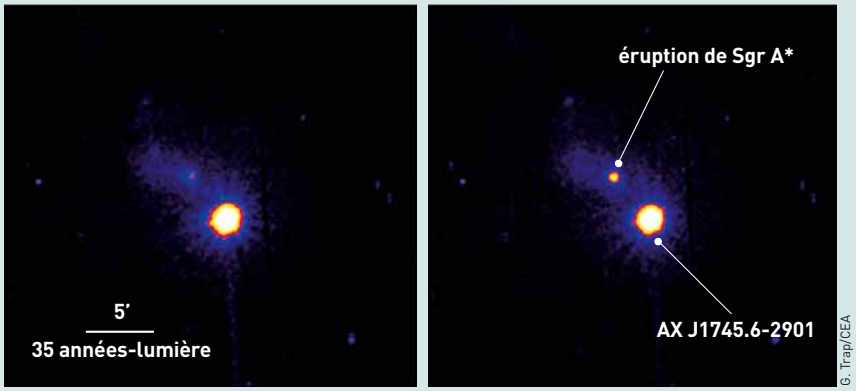
NSF/VLA/F. Yusef-Zadeh (NWU)

Figure 1.
Image radio du centre de la Galaxie montrant la nébuleuse spirale et la source compacte Sgr A* (point blanc au centre de l'image).

Un astre exceptionnel est tapi au cœur de la Voie lactée, vers la constellation du Sagittaire[1]. Cette région complexe et violente, dissimulée au regard par la matière interstellaire, peut néanmoins être observée dans les domaines des ondes radio, infrarouge, X et gamma. C'est ainsi que les astronomes y ont détecté un trou noir supermassif, d'environ quatre millions de masses solaires. À partir de 1992, les observations en infrarouge, réalisées sur une période d'une quinzaine d'années, d'une poignée d'étoiles situées en plein centre galactique et parcourant très rapidement des orbites elliptiques autour du même point, ont définitivement démontré sa présence.

Un tel mouvement ne peut en effet s'expliquer que par l'attraction d'une masse de plusieurs millions de fois celle du Soleil... concentrée dans un rayon inférieur à 100 fois la distance Terre-Soleil, soit 15 milliards de kilomètres. Aucun système aussi compact ne peut résister à l'effondrement gravitationnel : il s'agit donc forcément d'un trou noir géant. Son rayon d'horizon[2] est estimé à seulement 17 fois le rayon du Soleil.

De par sa puissance gravitationnelle, il domine la dynamique de la matière dans un rayon de plusieurs années-lumière, et peut notamment capturer une partie du vent stellaire des étoiles de la région. Tombant vers le trou noir, cette matière décrit une trajectoire spirale en formant un disque d'accrétion. Elle atteint des températures très élevées et émet des ondes électromagnétiques de diverses fréquences, avant de disparaître. C'est ainsi qu'en 1974, des observations radio (menées depuis les années 1950) ont découvert là une source d'émissions compacte, brillante et variable, au centre d'une nébuleuse spirale diffuse (figure 1). Nommée Sagittarius A* (Sgr A*), cette source se situe exactement au foyer des



G. Trap/CEA

Figure 2.
Le centre de la Galaxie vu par le télescope XMM-Newton en avril 2007 (caméra EPIC PN, rayons X de 2 à 10 keV), avant (à gauche) et pendant (à droite) une éruption X de Sgr A*. La position de la source radio Sgr A* est indiquée et témoigne que l'éruption X est bien associée au trou noir – non pas à d'autres objets comme la source AX J1745.6-2901.

(1) Le centre dynamique et de symétrie de notre Galaxie est situé dans l'hémisphère céleste austral, à environ 26 000 années-lumière de la Terre.

(2) Rayon d'horizon : surface sphérique entourant la singularité centrale d'un trou noir. Rien de ce qui pénètre à l'intérieur, pas même la lumière, ne peut s'en échapper.

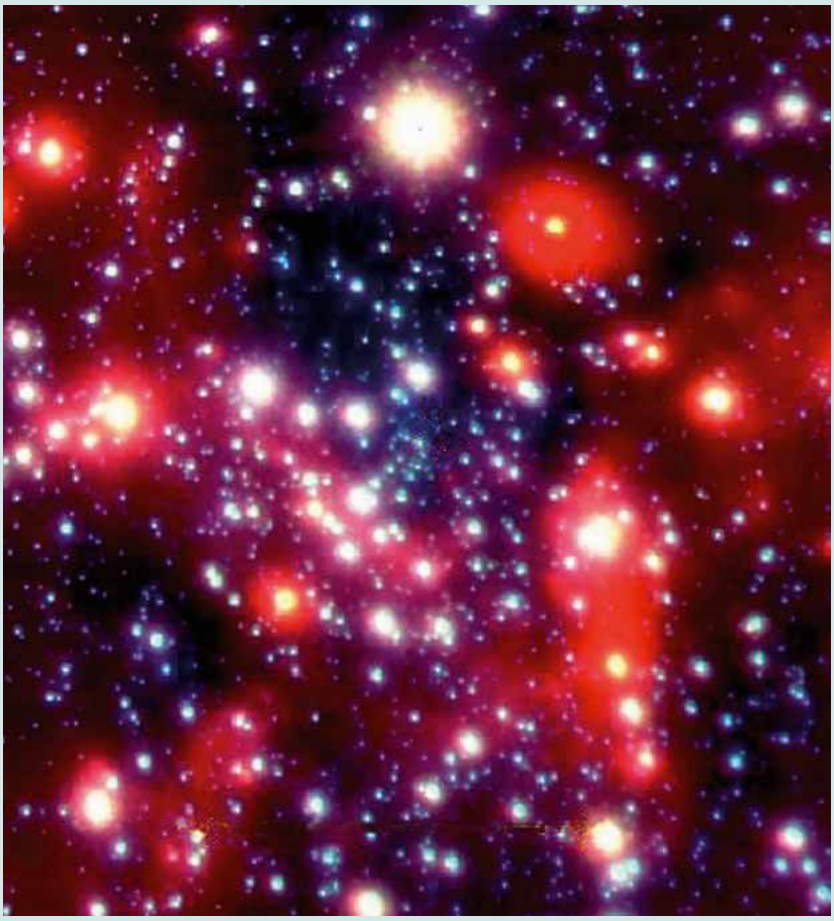
orbites des étoiles observées en infrarouge, et est donc considérée aujourd'hui comme la contrepartie du trou noir central.

Un déficit d'émissions

Malgré son éclat radio remarquable, cet objet émet une puissance totale très inférieure aux prévisions. C'est pourquoi les astronomes des hautes énergies cherchent depuis trois décennies sa contrepartie dans les domaines X et gamma, rayons énergétiques émis par les régions internes et chaudes du flot d'accrétion et qui portent les stigmates des effets relativistes dus au trou noir. En 1999, l'observatoire X Chandra de la NASA a enfin décelé une faible émission X persistante. Un milliard de fois moins intense que prévu, elle indique que la matière n'est pas accrétée au taux attendu. Néanmoins la découverte la plus spectaculaire de ces dernières années a été la détection, en 2000 et dans les années suivantes, de violentes éruptions X au cours desquelles la luminosité augmente jusqu'à 150 fois durant quelques heures.

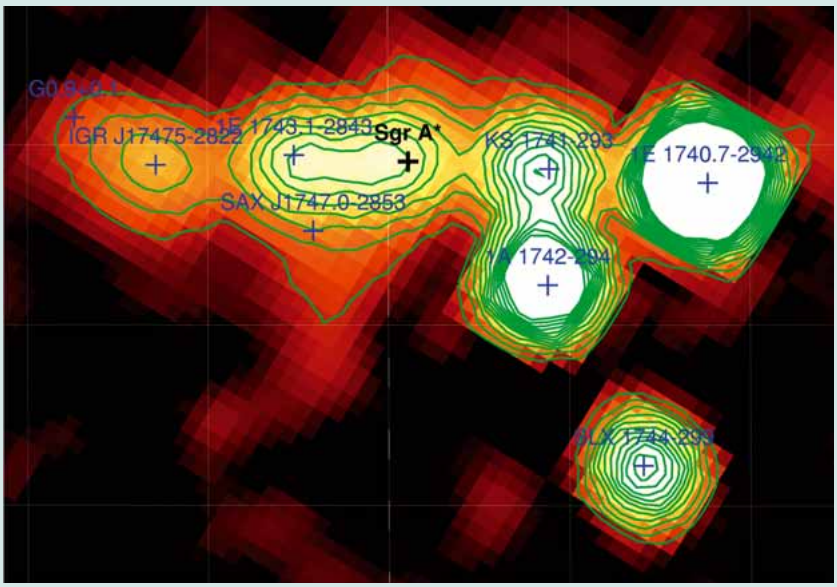
Des équipes du Service d'astrophysique du CEA/Irfu et de l'APC ont étudié plusieurs éruptions de Sgr A*, en mesurant simultanément les émissions X (observatoire spatial XMM-Newton de l'ESA), infrarouge (télescope VLT de l'ESO au Chili) et gamma (télescope IBIS de l'observatoire spatial INTEGRAL de l'ESA) ; voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90. La dernière campagne a observé, en X et en infrarouge proche, la deuxième plus brillante éruption connue de Sgr A* (figure 2). L'absence de signal gamma à cette occasion indique que l'émission gamma du centre galactique, récemment découverte par INTEGRAL (figure 3), n'est pas directement liée à ces éruptions. Elle révèle néanmoins la présence d'un puissant accélérateur cosmique de particules, dont la relation avec le trou noir central reste à élucider. Il faudra attendre la mise en opération de télescopes spatiaux X/gamma de nouvelle génération pour en savoir plus (voir *Simbol-X, pionnier des vols en formation*, p. 108).

> Andrea Goldwurm
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astroparticule et cosmologie (CNRS-Université Paris 7-CEA)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)



ESO

Image du centre galactique prise avec la caméra infrarouge NACO montée au foyer du télescope Yepun du *Very Large Telescope* (VLT) de l'ESO, installé sur le mont Paranal au Chili. Elle montre les étoiles les plus lumineuses de la région qui nourrissent, avec leurs puissants vents stellaires, le trou noir central.

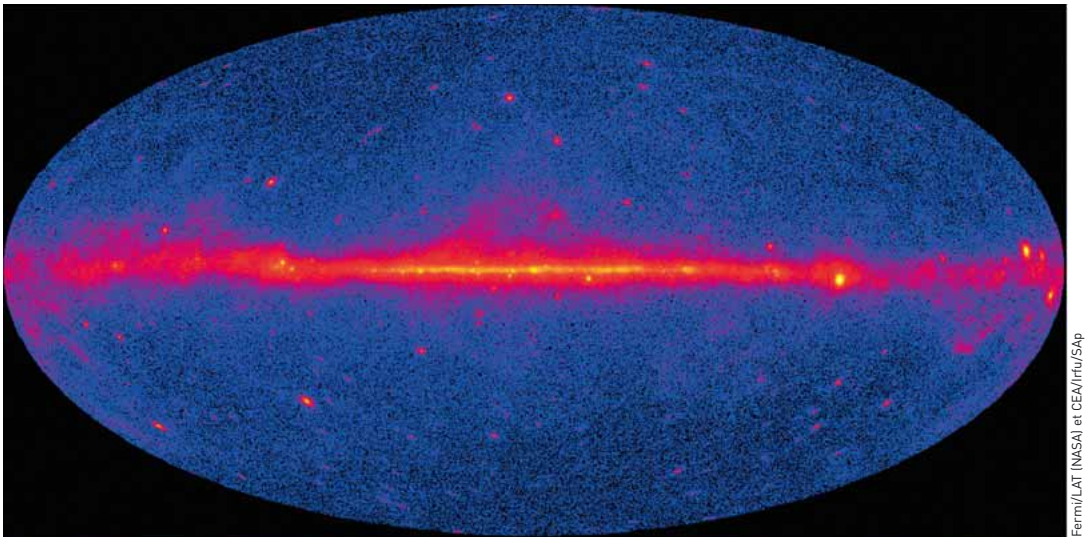


G. Bélanger/CEA

Figure 3.
Image (avec contours d'intensité) de la région centrale de la Galaxie enregistrée par le télescope IBIS d'INTEGRAL (rayons gamma de 20 à 40 keV). La position de Sgr A* est indiquée et montre que la source gamma au centre pourrait être liée au trou noir supermassif. Les autres sources gamma visibles sont pour la plupart associées à des systèmes binaires X connus, dont le microquasar 1E 1740.7-2942.

Élucider le mécanisme d'accélération des rayons cosmiques

Les galaxies baignent dans un flux de particules électriquement chargées se déplaçant à des vitesses comparables à celle de la lumière : les rayons cosmiques. Le processus de leur accélération recèle encore des mystères, mais il est communément admis que l'énergie nécessaire provient des supernovae.



Fermi/LAT (NASA) et CEA/Irfu/SAp

Carte du ciel en rayons gamma, obtenue par le télescope Fermi. Outre les sources ponctuelles, l'essentiel provient de l'irradiation du milieu interstellaire par les rayons cosmiques. Les collisions nucléaires avec le gaz génèrent entre autres des pions neutres[1] puis des photons gamma. La structure observée est essentiellement celle du milieu interstellaire, avec une forte concentration dans le plan et vers le centre de la Galaxie.

Les **rayons cosmiques** ont été baptisés ainsi lors de leur découverte au début du 20e siècle. « Rayons » parce qu'ils partagent avec les **rayons X** et **gamma** (**γ**), découverts à la même époque, la propriété d'**ioniser** la matière. « Cosmiques » à cause de leur origine extraterrestre. En fait, cette appellation est trompeuse : il ne s'agit pas d'un **rayonnement électromagnétique** mais d'un flux de particules chargées **relativistes**, donc très énergétiques. Ce sont essentiellement des **protons**, avec une fraction d'éléments plus lourds et quelques % d'**électrons**.

Le Service d'astrophysique du CEA/Irfu s'est illustré dans les années 1980 dans l'étude de leur composition détaillée, qui nous a appris que ces rayons cosmiques sont d'origine interstellaire et ont une durée de vie dans la **Galaxie** de l'ordre de 20 millions d'années. Leur spectre en énergie se prolonge régulièrement jusque vers $3 \cdot 10^{15}$ **eV**. Baignant l'ensemble de la Galaxie, les rayons cosmiques entretiennent l'ionisation d'une fraction du gaz jusqu'au cœur des nuages **moléculaires**. Ces particules électriquement chargées sont déviées par le **champ magnétique** galactique, et n'apportent donc aucune information sur leur provenance. En revanche, les **photons** X et gamma qu'elles émettent se propagent en ligne droite, permettant aux astronomes de trouver les sources des rayons cosmiques.

Une raquette de tennis

Étant donné leur énergie totale et leur durée de vie, il faut une puissance importante pour maintenir le niveau actuel des rayons cosmiques : cela représente environ 10 % de la principale source d'énergie du **milieu interstellaire**, les **supernovae**. C'est donc là, logiquement, qu'il faut chercher leur origine. En fait, ce n'est pas l'explosion elle-même qui accélère les particules, mais l'onde de choc qui en résulte (voir *Les restes de supernova*, p. 27). La théorie expliquant ce phénomène a été formalisée à la fin des années 1970. Elle s'appuie sur l'existence d'une **turbulence** magnétique dans le gaz ionisé, qui fait diffuser les rayons cosmiques. De par leur vitesse, ceux-ci traversent facilement l'onde de choc, qui ne se propage qu'à quelques milliers de km/s (soit 1 % de la vitesse de la lumière). En diffusant de part et d'autre du choc, ces particules gagnent en moyenne de l'énergie, à la manière d'une balle de tennis rebondissant sur une raquette qui avance, car le gaz n'a pas la même vitesse des deux côtés. Un choc est en effet assimilable à une discontinuité de la vitesse. Ce processus auto-amplifié – les particules accélérées excitent elles-mêmes la turbulence magnétique en amont du choc – capte une fraction importante de l'énergie cinétique disponible.

Il reste difficile, en revanche, d'expliquer comment accéder à des énergies supérieures à 10^{15} eV dans un reste de supernova. L'accélération est d'autant plus efficace que l'onde de choc se déplace vite et que la turbulence magnétique est intense. Cependant, plus une particule monte en énergie, plus le temps

(1) Pion neutre : particule qui, avec les pions chargés π^+ et π^-, joue un rôle important dans la cohésion du **noyau atomique**. De masse légèrement inférieure à celle des pions chargés (134,97 MeV/c^2) et d'une durée de vie beaucoup plus courte ($8{,}4 \cdot 10^{-17}$ s), π^0 se désintègre dans 98,79 % des cas en deux photons gamma, sinon en un photon gamma et une paire électron-positon.

d'accélération nécessaire augmente. Or, même dans les conditions les plus favorables (le champ magnétique turbulent atteignant le niveau du champ ordonné), le reste de supernova s'épuiserait avant que les particules parviennent à 10^{15} eV.

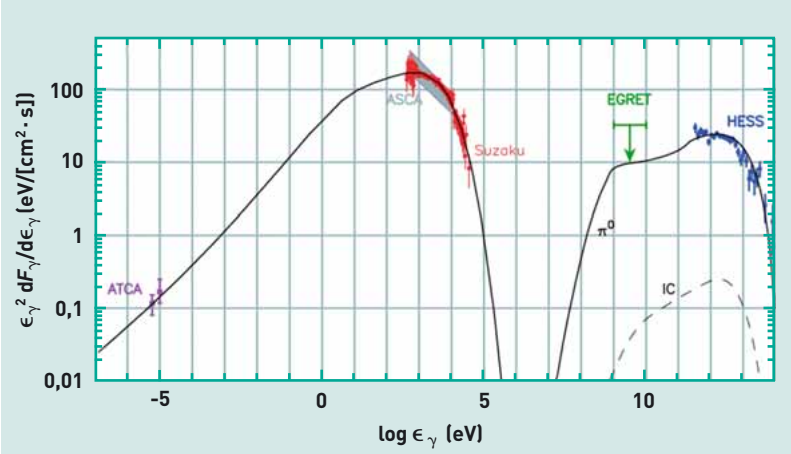
Une énergie inexplicable

Où chercher la clé de cette énigme ? La plupart des **étoiles massives** explosent en groupe, dans un environnement profondément modifié par les **vents** de toutes ces étoiles et les premières explosions. Le choc se développe dans un milieu très raréfié, et même si le mécanisme d'accélération fonctionne, l'émission associée sera faible. Les astronomes s'intéressent donc aux supernovae isolées, qui se développent dans un milieu plus dense et plus simple et sont de ce fait plus propices à l'observation. Les restes de supernovae historiques, comme SN 1006 (figure 1), conviennent particulièrement bien à la **modélisation** parce que leur âge est connu avec précision et que leur vitesse est encore élevée.

La première grandeur observable est l'**émission synchrotron** des électrons accélérés spiralant dans le champ magnétique. Les électrons ne représentent certes que quelques % des rayons cosmiques, mais ils constituent un traceur du mécanisme d'accélération. Les électrons très énergiques (10^{13} eV) émettent des rayons X alors que les autres (vers 10^9 eV) émettent des **ondes radio** (figure 2). Au début des années 2000, les observatoires en rayons X ont montré que l'émission est concentrée dans une nappe très mince juste au niveau du choc, alors que les particules devraient être présentes, comme le gaz, plus loin à l'intérieur. Les électrons perdent donc leur énergie (à cause du rayonnement synchrotron) très vite derrière le choc. Cela signifie que le champ magnétique est très élevé, dépassant de plus de dix fois les prévisions. Les rayons cosmiques peuvent donc exciter la turbulence magnétique bien au-delà du niveau du champ ordonné. Cette amplification inattendue du champ magnétique explique que certaines particules puissent atteindre une énergie de $3 \cdot 10^{15}$ eV.

XMM-Newton (ESA) et CEA/Irfu/SAp

Figure 1.
Image en rayons X du reste de la supernova de 1006 (de la taille de la Lune), acquise avec l'observatoire XMM-Newton. Le rouge correspond à l'émission thermique de l'oxygène (de 0,5 à 0,8 **keV**), le vert et le bleu à des émissions légèrement plus énergiques (respectivement 0,8 à 2 keV et 2 à 4,5 keV). L'émission synchrotron des électrons accélérés apparaît blanche.



(tiré de E. G. Berezhko et H. J. Völk, *Astronomy & Astrophysics*, 492, p. 695, 2008)

Figure 2.
Spectre du reste de supernova RX J1713.7-3946 sur tout le domaine électromagnétique. Les points de mesure (en couleur) sont dans les domaines radio, X et gamma. La première bosse (des ondes radio aux rayons X) correspond à l'émission synchrotron des électrons accélérés. La deuxième bosse (en gamma) est composée de l'**émission Compton inverse** des électrons (IC) et de la désintégration des pions[1] produits lors d'interactions nucléaires entre le gaz et les protons accélérés (π^0). EGRET était le prédécesseur de Fermi. Le modèle superposé (la courbe pleine) privilégie l'émission gamma des protons, mais il est aussi possible de construire un modèle dominé par l'émission des électrons en gamma (courbe en tirets).

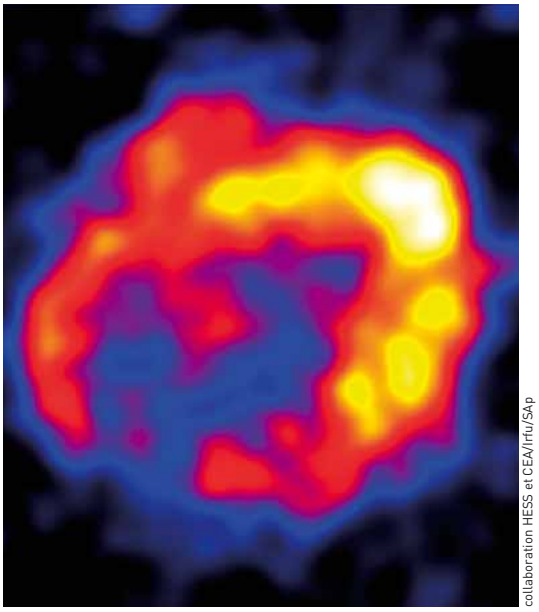
Des questions en suspens

Les astrophysiciens commencent donc à bien cerner le mécanisme d'accélération des rayons cosmiques, d'autant que l'observation de plusieurs restes de supernovae, dont SN 1006 en 2008, en rayons gamma par l'instrument HESS (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90) fournit de nouvelles données (figure 3). Plusieurs questions demeurent néanmoins. Tout d'abord, existe-t-il vraiment des protons accélérés, et pas seulement des électrons ? La nature de l'émission gamma détectée par HESS reste ambiguë (figure 2). Ensuite, quel est le rendement du processus ? Quelle fraction de l'énergie cinétique disponible passe dans les rayons cosmiques ? Pour répondre, il faudra détecter les protons, qui sont la composante dominante, et mesurer la densité du gaz. Le flux de rayons gamma donnera alors une idée de la quantité de protons accélérés.

Enfin, dernière question : en quoi l'accélération dépend-elle de l'orientation du champ magnétique ? Dans SN 1006, l'émission synchrotron n'est pas uniforme mais concentrée dans deux croissants (figure 1). Cette structure provient certainement de l'orientation du champ magnétique avant l'explosion. L'émission X très faible au centre de SN 1006 indique que les croissants sont plutôt des calottes situées aux pôles magnétiques, et que l'accélération fonctionne lorsque le choc se propage le long du champ magnétique. Or des études statistiques dans le domaine radio tendent à prouver que l'émission se produit plutôt dans une ceinture équatoriale. Et, pour ne rien simplifier, il existe des théories expliquant les deux situations !

Des progrès menés de front

La théorie de l'accélération au choc par diffusion progresse en même temps que les observations. Des **modèles**, prenant en compte à la fois la génération de turbulence par les rayons cosmiques et leur rétroaction sur la structure du choc, se développent. Les astrophysiciens du CEA/Irfu les intègrent dans



collaboration HESS et CEA/Irfu/SAp

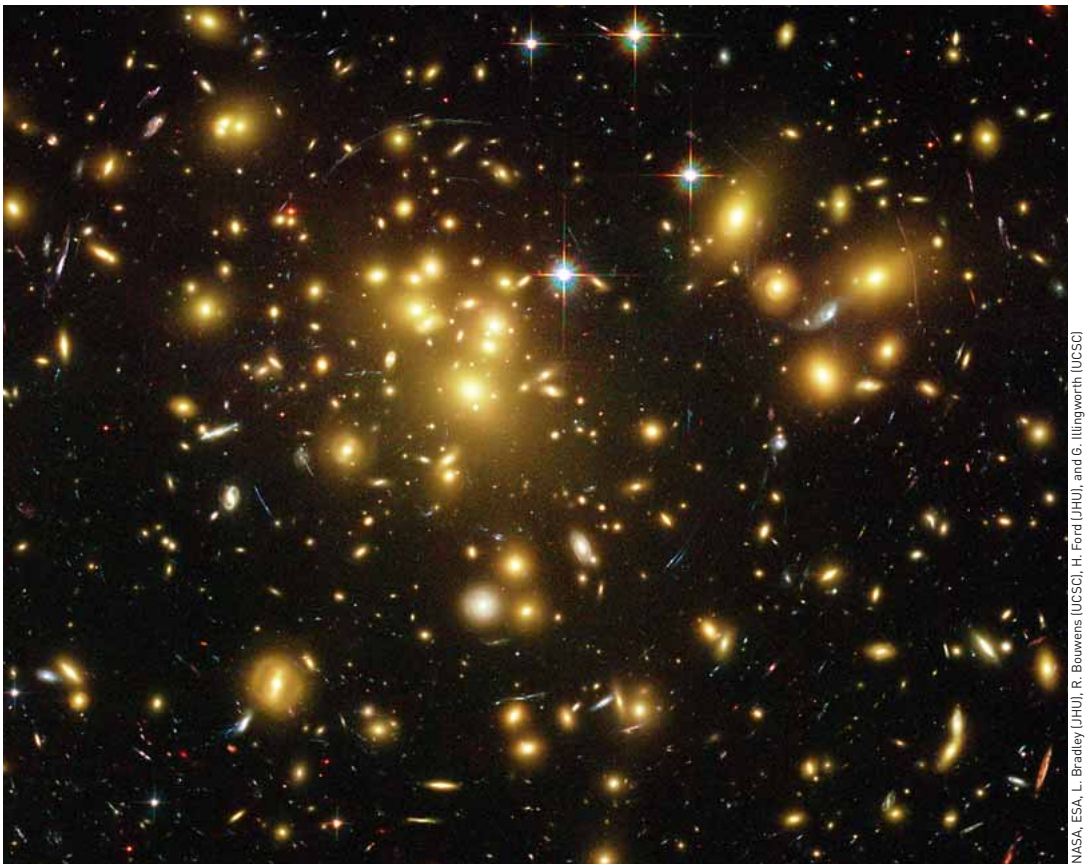
Figure 3.
Le reste de supernova RX J1713.7-3946 vu par l'instrument HESS dans la gamme des rayons gamma de très haute énergie (TeV). Les pics d'émission observés sont dus à la structure du gaz interstellaire.

un modèle global de reste de supernova. Ils vont dès maintenant approfondir leurs études en rayons X et, dans le cadre d'un grand projet sur SN 1006, sonder ce reste de supernova avec l'observatoire XMM-Newton, dont la sensibilité devrait apporter des réponses sur la rétroaction et l'orientation du champ magnétique (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90). Les questions sur les protons et le rendement reposent essentiellement sur l'astronomie gamma. Si la **résolution spatiale** dans ce domaine reste limitée, en revanche la gamme d'énergie va s'étendre considérablement. En effet, les instruments HESS 2 (mise en service début 2010) et l'observatoire Fermi (lancé en 2008) couvriront à eux deux la bande gamma de 100 **MeV** à 10 **TeV**, et permettront de distinguer les composantes provenant des électrons et des protons.

> **Jean Ballet, Anne Decourchelle** et **Isabelle Grenier**
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

À la recherche des grands ancêtres

Quand les premières galaxies commencèrent-elles à briller dans l'histoire de l'Univers ? En quoi différaient-elles des galaxies actuelles ? La traque des objets les plus anciens de l'Univers cherche à répondre à ces questions.



NASA, ESA, L. Bradley (JHU), R. Bouwens (UCSC), H. Ford (JHU), and G. Illingworth (UCSC)

L'**amas de galaxies** Abell 1689 où une galaxie très éloignée avec un décalage spectral d'environ 7,6 a probablement été découverte. L'étude des premières galaxies est un sujet de recherche active extrêmement fascinant.

Dans un passé très lointain, l'Univers était très dense et très chaud. Le **fond diffus cosmologique** nous révèle que, 380 000 ans après le **big bang**, il était encore constitué d'un **plasma** homogène (voir *La grande histoire thermique de l'Univers*, p. 62). De toute évidence, il n'existait aucune **étoile** ou **galaxie** en ce temps-là. Les écarts par rapport à cette homogénéité – mesurés par les satellites américains COBE (*COsmic Background Explorer*), puis WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) et, au cours des prochaines années, par le satellite Planck lancé en mai 2009 (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90) – ne dépassaient guère une partie pour 100 000. Et pourtant, ces fluctuations minimes intéressent au plus haut point les **cosmologistes**. Elles constituent en effet les germes à partir desquels se sont constitués les étoiles, galaxies et **amas** qui, 13 milliards d'années plus tard, peuplent l'espace intergalactique.

Pour comprendre la formation initiale des galaxies, il faut identifier les objets les plus anciens de l'Univers, ou tout au moins recueillir leur lumière fossile. Cette traque repose sur le fait que l'Univers est en expansion. Tous les objets s'éloignant les uns des autres, les **photons** émis par une source et reçus par un observateur subissent un **décalage spectral**, dit **redshift**, noté z (voir Mémo A, ***Sonder l'Univers sur toute la gamme lumineuse***, p. 31). Leur **fréquence** – et donc leur énergie – diminue, un peu comme la sirène d'une ambulance s'éloignant de nous paraît devenir de plus en plus grave. Or tous les objets, même les plus anciens, sont (ou étaient) composés des mêmes **éléments**, dont les **longueurs d'onde** ou fréquences d'**émission** et d'**absorption** ont été mesurées avec précision au laboratoire. En comparant à ces références les longueurs d'onde ou fréquences présentes dans le **spectre** d'une source cosmologique, les physiciens peuvent donc estimer sa distance et le moment où sa lumière a été émise. Le rapport des longueurs d'onde observées aux longueurs d'onde intrinsèques est exactement celui de l'échelle globale de l'Univers actuel à l'échelle de l'Univers lorsque la lumière a été émise. Par convention, ce paramètre important est pris comme étant égal à « un plus le redshift », donc : $1 + z$. Un décalage spectral nul ($z = 0$) correspond au moment présent et caractérise la lumière provenant des objets proches, alors que les valeurs élevées de z se rapportent à l'Univers distant.

Reconnaître les objets très éloignés

Le fond diffus cosmologique, émis par un Univers âgé de 380 000 ans, a une valeur de z légèrement supérieure à 1 000. Pour la plupart des galaxies et étoiles recensées, z varie de 0 à 3. Cette dernière valeur correspond à un Univers âgé d'environ 2,2 milliards d'années. Les cosmologistes considèrent que les **galaxies** « normales », comme les **spirales** comparables à notre **Voie lactée** ou les **galaxies elliptiques** très massives (par exemple M87 dans l'Amas de la Vierge), se sont formées après cette date. Les « premières galaxies » auraient, elles, un décalage spectral supérieur à 3. Malheureusement, il devient très difficile, avec les instruments existants, de localiser et étudier des galaxies au-delà de cette limite. Il faut braquer les plus grands télescopes sur une même région pendant de longues périodes[1]. Cela donne des images certes très « profondes » mais comportant tellement de galaxies qu'il est délicat de distinguer celles dont le rayonnement est faible car elles sont éloignées, de celles qui émettent peu parce qu'elles sont petites, tout simplement. Les galaxies les plus éloignées connues à ce jour avec certitude se situent à un redshift d'environ 7, correspondant à un Univers âgé de moins d'un milliard d'années.

Pour reconnaître les objets les plus distants, les astrophysiciens utilisent la technique de la discontinuité de Lyman (*Lyman Break Technique*), qui s'est largement répandue depuis le milieu des années 1990. Elle repose sur le fait que l'**hydrogène** intergalactique **absorbe** les photons de longueur d'onde inférieure à 912 **Å**, correspondant à l'**ultraviolet extrême**. Cette « limite de Lyman » représente l'énergie nécessaire pour arracher l'**électron** de l'**atome** d'hydrogène. Il en résulte que très peu, voire aucune lumière émise avec une longueur d'onde inférieure à 912 Å ne nous parvient des galaxies distantes. Cela donne lieu à une discontinuité (ou rupture) très caractéristique qui permet de reconnaître les galaxies lointaines par leurs couleurs anormales. Pour les astronomes, le terme couleur fait généralement référence au rapport des flux ou **luminosités** observés à partir de bandes passantes différentes (figure 1). Or le décalage spectral des sources très éloignées déplace cette limite vers des longueurs d'onde supérieures[2]. Par exemple, pour z égal à 3,

(1) Le champ ultra-profond de Hubble (*Hubble Ultra Deep Field*), une petite région de ciel d'environ 3 x 3 **arcmin**^{2}, a ainsi été observée pendant environ 400 heures, au moyen du télescope spatial Hubble de la **NASA/ESA**, en utilisant quatre filtres de longueurs d'onde différentes, de 4 000 à 9 000 Å.

(2) Ce qui permet de l'observer depuis la Terre, alors que l'atmosphère bloque les longueurs d'onde de l'ordre de 1 000 Å.

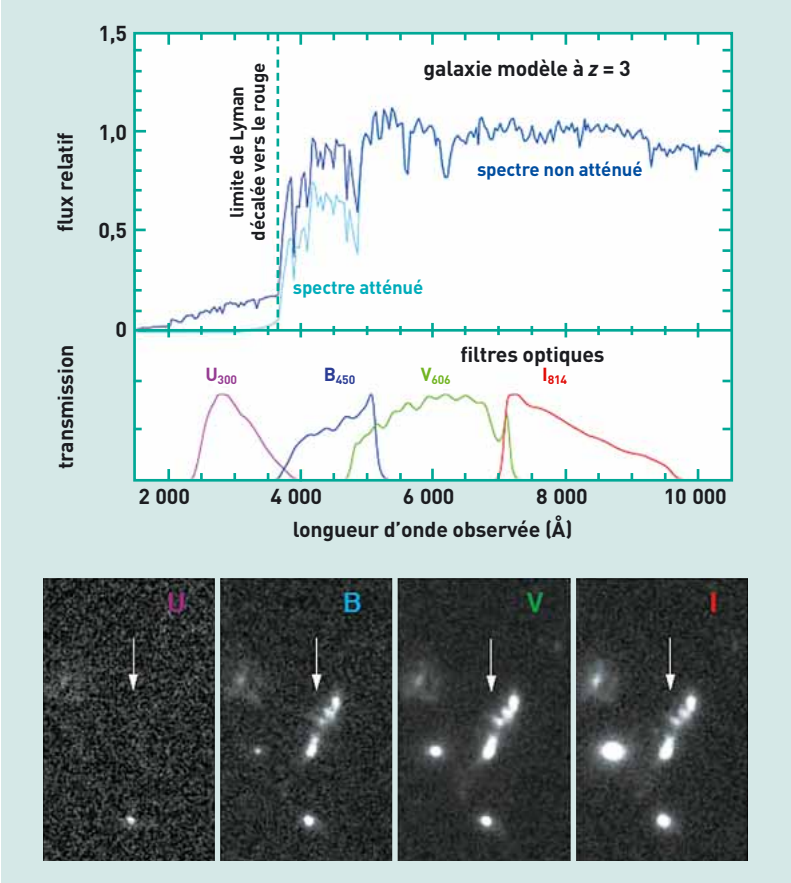
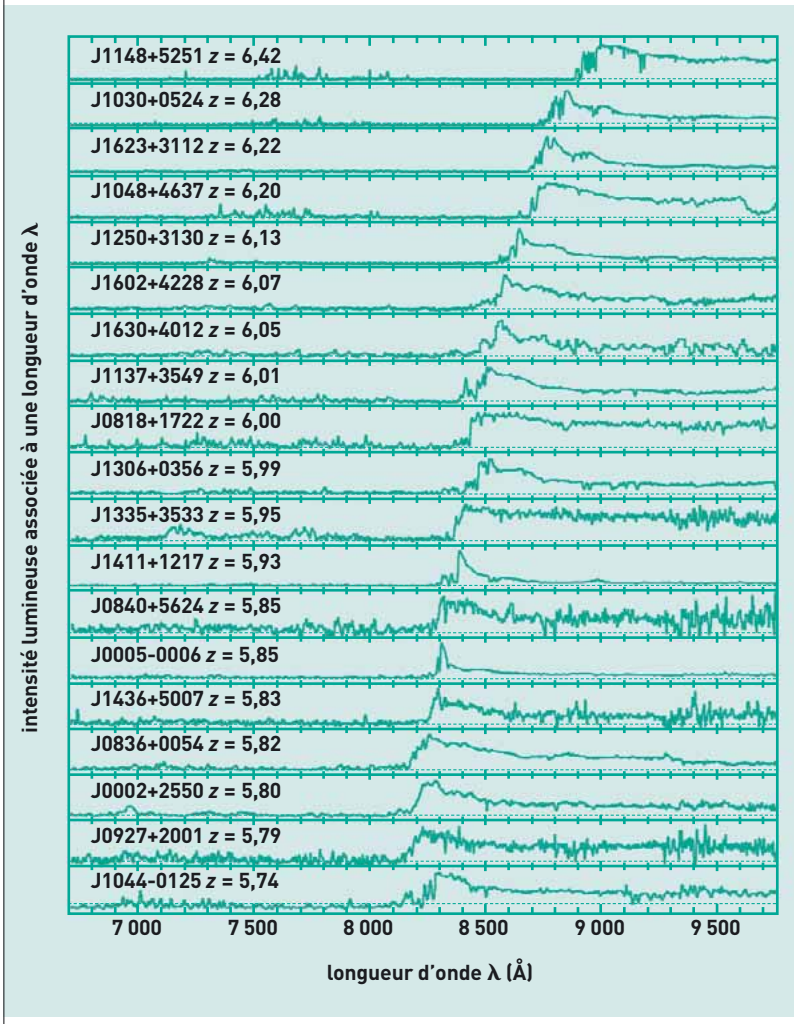


Figure 1.
Illustration de la technique de discontinuité de Lyman, en utilisant les images obtenues avec quatre filtres optiques équipant le télescope spatial Hubble. La photo du bas montre une galaxie réelle à $z = 3$ sélectionnée par cette technique.

(M. Dickinson, *Proceedings Symposium "The Hubble Deep Field"*, May 1997, STScI, eds. M. Livio, S. M. Fall and P. Madau)

NASA, ESA/JPL-Caltech/B. Mobasher (STScI/ESA)

Champ ultra-profond de Hubble dévoilant de nombreux objets parmi lesquels les scientifiques doivent distinguer les galaxies éloignées de celles qui sont petites.



[Fan Xiaohui et al., *The Astronomical Journal*, 132, p. 117-136, 2006]

Figure 2.
Spectres de **quasars** à décalage spectral très élevé, faisant partie des sources les plus lumineuses connues à redshift élevé. Ces objets ont été choisis parce que leur nature a été clairement confirmée par la discontinuité de Lyman et la spectroscopie correspondante. La discontinuité à de tels redshifts est proche de 1 216 Å, du fait du phénomène de la forêt Lyman-alpha.

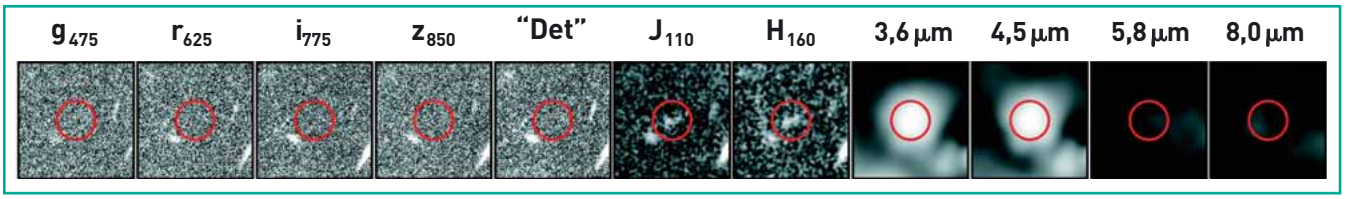
la discontinuité est perçue à environ 3 600 Å, ce qui correspond aux **rayons ultraviolets**. Les galaxies très éloignées (*z* supérieur à 3) présentent une discontinuité dans le **visible**. Au fur et à mesure de l'augmentation du redshift, un phénomène qui tend à déplacer la discontinuité vers des longueurs d'onde plus élevées vient s'ajouter : il s'agit du rôle joué par la forêt de nuages Lyman-alpha(3), qui absorbe les rayonnements émis entre 912 et 1 216 Å (figure 2). La galaxie la plus lointaine connue, dont le décalage spectral vaut 6,96, présente une discontinuité vers 10 000 Å, donc située dans le **proche infrarouge**(4).

La course aux premières galaxies

À l'heure actuelle, les astronomes ont recensé plusieurs milliers de galaxies présentant un décalage spectral d'environ 3, plusieurs centaines d'autres avec une valeur de *z* proche de 6, mais seulement une poignée de galaxies dont le redshift dépasse 6,5. Encore ne s'agit-il que de « candidats galaxies » : plusieurs types d'objets pourraient présenter des couleurs similaires à celles produites par les discontinuités de Lyman à un décalage spectral élevé. Par exemple, les **naines de type M** ou les **naines brunes** montrent un type de discontinuité similaire à des longueurs d'onde du domaine visible et même **infrarouge proche**. En outre, des galaxies ayant un redshift inférieur, mais très vieilles ou extrêmement rougies par la poussière, peuvent être confondues, du fait de leurs couleurs, avec des galaxies à valeur de *z* très élevée.
Par conséquent, la discontinuité de Lyman ne permet pas à elle seule d'identifier à coup sûr les objets éloignés.

(3) Forêt de nuages Lyman-alpha : nuages de gaz qui absorbent une partie de la lumière émise par les galaxies et les quasars lointains, faisant apparaître dans leurs spectres de nombreuses raies d'absorption.

(4) D'autres techniques se sont révélées efficaces comme, par exemple, la recherche des émissions Lyman-alpha décalées vers le rouge à 1 216 Å, et dans certains cas, des galaxies très éloignées ont été découvertes par l'intermédiaire des **sursauts gamma** détectés dans leur forte émission d'énergie.



(L. Bradley *et al.*, *The Astrophysical Journal*, 678, p. 647-654, 2008)

Figure 3.
Probablement l'objet le plus éloigné connu, les scientifiques pensent que cette galaxie à discontinuité de Lyman se trouve à un redshift d'environ 7,6. Découverte dans le champ de l'amas de galaxies Abell 1689, sa luminosité est amplifiée par l'**effet de lentille gravitationnelle** dû à l'amas. Les images en couleurs multiples montrent que cette galaxie est uniquement détectée à des longueurs d'onde supérieures à 1,1 µm et est invisible à des longueurs d'onde inférieures. g, r, i et z sont quatre filtres dans le domaine du visible allant du bleu au rouge, proche de l'infrarouge. Quant aux filtres J et H, ils ne laissent passer que la lumière infrarouge. "Det" correspond à une image combinant plusieurs couleurs.

Il faut la compléter par des études spectroscopiques afin de déterminer leur distance sans ambiguïté. Relativement aisé pour des galaxies de décalage spectral proche de 3, le processus devient très long et souvent irréalisable au-delà de $z = 6$. Il devient également de plus en plus difficile d'étudier les propriétés de ces galaxies très éloignées. Certains scientifiques ont déclaré avoir découvert des galaxies jusqu'à $z = 7{,}5$, ce qui semble tout à fait plausible, même s'il n'est pas encore possible de le confirmer par la spectroscopie (figure 3). Des revendications encore plus audacieuses font état de galaxies présentant des décalages spectraux de 10 voire de 12, mais ces découvertes restent controversées.

Une ionisation mystérieuse

S'il est fascinant de rechercher les galaxies les plus éloignées, les astronomes ne sont pas mus par le seul désir de repousser les limites de l'Univers connu. Il s'agit aussi de répondre à certaines questions scientifiques fondamentales. Par exemple, l'observation du fond diffus cosmologique a révélé que l'hydrogène de l'Univers a été ré-**ionisé** à une époque correspondant à un décalage spectral d'environ 11. Autrement dit, l'hydrogène était essentiellement neutre de $z = 1\,000$ à $z = 11$, puis principalement ionisé de $z = 11$ à aujourd'hui ($z = 0$). Pour ioniser la plupart des atomes, il est nécessaire de leur apporter de l'énergie et d'arracher leurs électrons. Cette énergie est supposée être fournie par le rayonnement ultraviolet émis par les premiers objets formés. Des photons ayant des longueurs d'onde inférieures à 912 Å sont indispensables au processus. Reste à trouver les sources du rayonnement ultraviolet. De tels photons pourraient provenir d'étoiles en formation ou de l'**accrétion** de matière sur les premiers **trous noirs** supermassifs. Pour corroborer ces idées, il faudrait démontrer qu'il y a suffisamment de sources à un décalage spectral très élevé pour ré-ioniser l'Univers. Or les astronomes sont encore bien loin de cet objectif. Même à des redshifts plus faibles, aux environs de 6, il n'a pas été détecté suffisamment de galaxies. Des recherches intensives s'efforcent aujourd'hui de résoudre cette énigme. Les théories les plus courantes suggèrent qu'il existe d'innombrables petites galaxies, non encore découvertes, produisant la quantité de rayonnement ultraviolet requis.

Étoiles et poussière

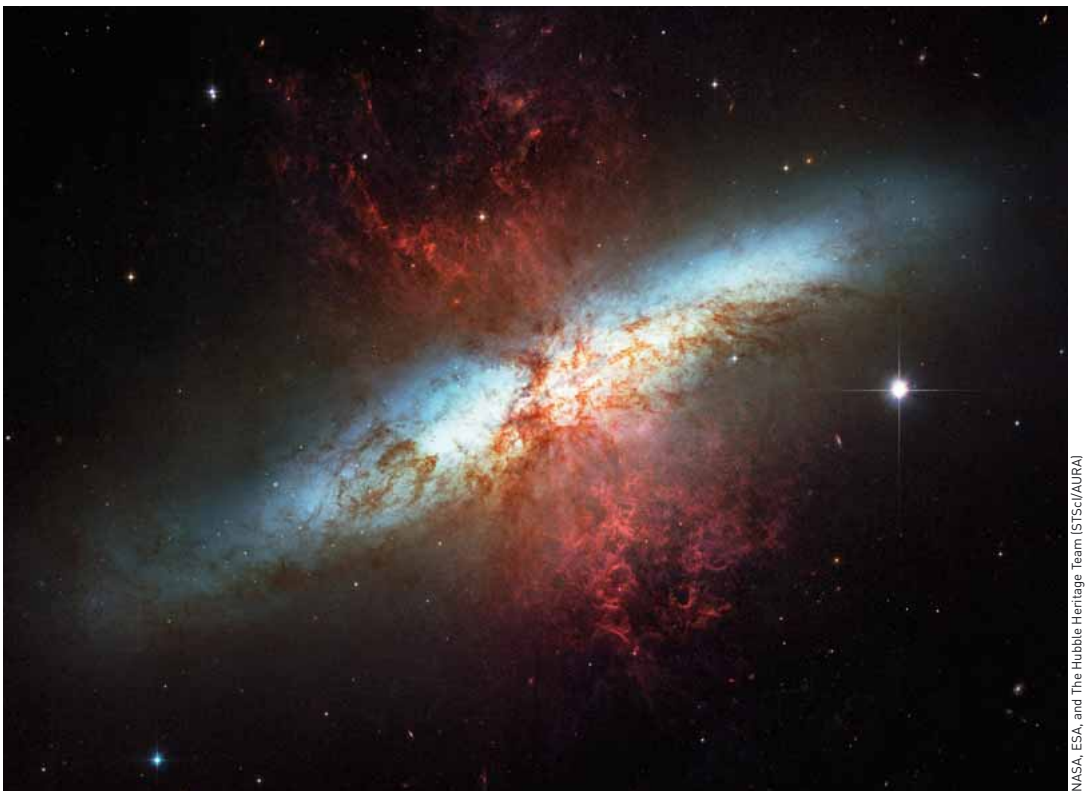
La recherche en matière de galaxies distantes tente actuellement d'éclaircir un autre mystère, tout aussi fascinant : celui des étoiles de *population III*. Historiquement, les astronomes ont regroupé les étoiles riches en métal des bras spiraux de la Voie lactée dans la *population I*, et les étoiles plus anciennes et plus pauvres en métal, situées dans le **bulbe** galactique, dans la *population II* (voir *La vie des galaxies actives*, p. 44). Cependant, selon certaines théories, lorsque de la matière gazeuse fut convertie en étoiles pour la première fois, des types très différents d'étoiles ont été créés. En l'absence de métaux (**éléments** plus **lourds** que l'hydrogène et l'**hélium**), il ne pouvait se former que des étoiles très massives : plusieurs centaines de fois la **masse du Soleil**. Le spectre de tels objets comporterait nécessairement des **raies d'émission** très intenses de l'hélium. Or, malgré des efforts continus, rien de semblable n'a été observé à ce jour. La fabrication et la dissémination d'éléments lourds ont donc probablement eu lieu très tôt dans l'histoire de l'Univers. La découverte d'étoiles de *population III* demeure cependant un objectif important. Elle permettrait de comprendre et étudier l'Univers à un moment où la majeure partie du gaz était à son état originel, juste après la formation des premiers éléments chimiques (hydrogène et hélium) par le big bang. Les astrophysiciens attendent beaucoup du lancement du télescope spatial James Webb, au cours de la prochaine décennie (voir *JWST : regard sur un passé de treize milliards d'années*, p. 102). Ils espèrent trouver alors quelles sortes d'objets ont ré-ionisé l'Univers, et démontrer l'existence des étoiles de *population III*.

Enfin, la plupart des techniques de détection utilisées à ce jour, basées sur le rayonnement ultraviolet, ne peuvent s'appliquer qu'à des objets dont l'émission ne traverse pas de la poussière cosmique, laquelle absorbe ce type de photons. Très récemment, des astrophysiciens du CEA ont identifié des galaxies géantes produisant des étoiles à des valeurs de z très élevées, parfois supérieures à 4, grâce à la détection du **continuum** émis par la poussière. Beaucoup d'objets de ce type pourraient exister, même s'ils présentent des taux de formation d'étoiles plus faibles que les galaxies extrêmes découvertes à ce jour. Le télescope spatial Herschel, lancé en mai 2009, (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90) et ultérieurement la mise en service du radiotélescope géant ALMA (*Atacama Large Millimeter Array*) au Chili ouvriront de nouvelles perspectives de recherche pour identifier et étudier des premières galaxies obscurcies par la poussière.

> Emanuele Daddi
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Formation des galaxies : une histoire paradoxale

Les moyens d'observation actuels permettent de remonter de plus en plus loin dans le passé de l'Univers. Depuis quelques années, les astrophysiciens s'attachent à reconstituer le scénario de l'évolution des galaxies depuis les premières formées. Cela ne va pas sans surprises...



NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

Messier 82, aussi appelée la galaxie cigare, est la plus proche galaxie (13 millions d'années-lumière) ayant une « flambée de formation d'étoiles ». Elle se trouve dans la direction de la Grande Ourse. Il s'agit d'une galaxie spirale, vue par la tranche, dont les explosions d'étoiles (supernovae) sont si puissantes et nombreuses qu'elles éjectent le gaz interstellaire hors de la galaxie. La couleur rouge du gaz filamentaire qui s'échappe de la galaxie est une couleur artificielle utilisée pour visualiser le gaz ionisé.

La pointe d'un stylo tenu à bout de bras ne cache qu'une infime fraction de la voûte céleste. Et pourtant, les récentes images profondes du ciel ont détecté tellement de **galaxies** qu'il en « tiendrait » près de 2 000 derrière cette seule pointe de stylo ! Rapportées à l'ensemble du ciel, ces observations indiquent que l'Univers contient au moins 120 milliards de galaxies. Les galaxies sont donc à l'Univers ce que les **étoiles** sont aux galaxies, puisque la **Voie lactée** contient 230 milliards d'étoiles. La lumière des plus lointaines a mis près de 13 milliards d'années, soit 95 % de l'âge de l'Univers[1], à parvenir aux observateurs. Les scientifiques voient donc aujourd'hui les galaxies telles qu'elles étaient à différentes époques du passé. En combinant toutes ces informations, ils tentent de dresser une sorte de « portrait-robot » de la galaxie-type à différents moments de l'histoire, reconstituant ainsi le scénario de la formation des galaxies.

Pour cela, ils doivent observer le ciel dans toute l'étendue – toutes les **longueurs d'onde** ou « couleurs » – du **spectre électromagnétique**, car chaque processus **cosmologique** émet des rayonnements dans un domaine particulier[2]. Les **rayons** de haute énergie (**X** et **gamma**) proviennent ainsi des événements les plus chauds, donc énergétiques, comme le gaz chauffé en tombant dans un **trou noir** supermassif, les explosions d'étoiles… Les rayonnements de basse énergie, comme l'**infrarouge** ou les **ondes radio**, révèlent les cocons de poussière (là où naissent les étoiles), le gaz interstellaire et les restes de **supernovae**. Les étoiles formées rayonnent la majorité de leur **lumière** dans le domaine du **visible** ou de l'**ultraviolet** (voir Mémo A, ***Sonder l'Univers sur toute la gamme lumineuse***, p. 31). Ainsi, selon la couleur dans laquelle est observée une galaxie, sa forme, sa morphologie, sa composition changent. Au cours des dernières années, ces observations multicouleurs ont révolutionné la connaissance scientifique de l'évolution des galaxies (encadré)… et fait naître de nouvelles questions, parfois à la limite du paradoxe.

(1) Lorsque les astronomes parlent de l'âge de l'Univers, ils font référence au temps qui s'est écoulé depuis le **big bang** qui est estimé à 13,7 milliards d'années. Le véritable âge de l'Univers reste inaccessible car les théories actuelles ne permettent pas d'étudier l'Univers au-delà du big bang.

(2) Pour comprendre complètement l'histoire des galaxies, il faut aussi prendre en compte leur environnement. En effet, la plupart d'entre elles (environ 90 %) sont concentrées en groupes de quelques unités, et le reste (près de 10 %) en amas de plusieurs centaines de galaxies. De plus, les **modèles** théoriques suggèrent qu'entre les galaxies elles-mêmes existent des ponts de gaz, sortes de filaments invisibles (jusqu'à aujourd'hui mais peut-être les observera-t-on dans le futur) qui les nourrissent.

Deux scénarios opposés

Au cours de l'histoire de l'astrophysique, deux scénarios ont été envisagés pour expliquer la formation des galaxies : *bottom-up* et *top-down*. Dans le premier cas, les premières galaxies furent des « naines » qui, par fusions successives, ont constitué des ensembles de plus en plus grands et massifs. Dans un tel scénario, les galaxies massives, comme la Voie lactée, proviennent de la fusion d'une centaine de ces entités-galaxies. Le scénario *top-down* suppose au contraire que les plus grandes structures de l'Univers se créent en premier puis se fragmentent. Les galaxies seraient alors les grumeaux d'une super-structure **primordiale**, devenue un **amas de galaxies** aujourd'hui. La découverte de galaxies en phase de fusion ainsi que celle des germes primordiaux des galaxies, présents dans le **fond diffus cosmologique**, ont participé à l'acceptation générale du scénario *bottom-up*. Dans ce contexte, la formation d'une galaxie est un processus continu puisqu'elle résulte de fusions successives, et l'on parle de formation hiérarchique des galaxies.

Il y a un peu plus d'une dizaine d'années, l'étude de la génération d'étoiles dans les galaxies a cependant jeté un sérieux trouble. Les astrophysiciens ont en effet constaté qu'au lieu d'apparaître en dernier, les galaxies les plus massives ont au contraire créé toutes leurs étoiles très tôt dans l'histoire de l'Univers, tandis que les moins massives continuent de se former encore aujourd'hui. Cette propriété des galaxies, à l'inverse de ce qui serait attendu dans le cadre du scénario *bottom-up*, représente l'une des grandes énigmes pour les astrophysiciens.

Évolution des galaxies : les mécanismes à l'œuvre

Plusieurs mécanismes entrent en jeu au cours de l'histoire évolutive des **galaxies**.

La *formation d'**étoiles***. Lors de ce mécanisme, le gaz interstellaire produit des grumeaux dans lesquels naissent des **molécules**, qui vont elles-mêmes refroidir le gaz. Ce dernier s'effondre alors jusqu'à des densités suffisamment élevées pour créer des étoiles. Les astronomes parlent de nuages moléculaires géants (GMC) pour décrire ces régions internes aux galaxies.

La *formation et la croissance du **trou noir** supermassif* situé au centre des galaxies. L'étude du mouvement des étoiles au centre de la **Voie lactée** montre qu'elles sont attirées par une masse invisible très concentrée, un trou noir supermassif de près de 4 millions de fois la **masse du Soleil**. Les astronomes savent aujourd'hui que pratiquement toutes les galaxies contiennent un tel trou noir, qui peut peser jusqu'à plusieurs milliards de masses solaires.

L'*évolution morphologique* caractérise le changement de forme que peut subir une galaxie au cours de son histoire. On parle généralement de morphologie pour décrire la forme de l'ensemble des étoiles, car le gaz est plus difficile à observer.

L'*arbre « généalogique » ou de fusions* (*merging tree*) suit, comme chez un être humain, le passage des ancêtres (les galaxies de plus petite masse) aux descendants résultant de la fusion de ces petites galaxies, jusqu'à arriver à la galaxie massive actuelle.

L'***accrétion** de gaz intergalactique*. Contrairement aux apparences, les galaxies ne sont pas des êtres isolés. Il peut arriver que deux galaxies se croisent et fusionnent (ou ne fassent que modifier leurs formes sans fusionner) mais la croissance en masse des galaxies vient aussi de leur capacité de recevoir ou d'attirer la matière environnante.

Debra Meloy Elmegreen (Vassar College) *et al.*, NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI)

Fusion de deux galaxies spirales vues de face. Dans quelques milliards d'années, la grande galaxie spirale de gauche (NGC 2207) aura avalé sa proche voisine (IC 2163) et il deviendra difficile de retrouver la trace de cet événement dans la future galaxie.

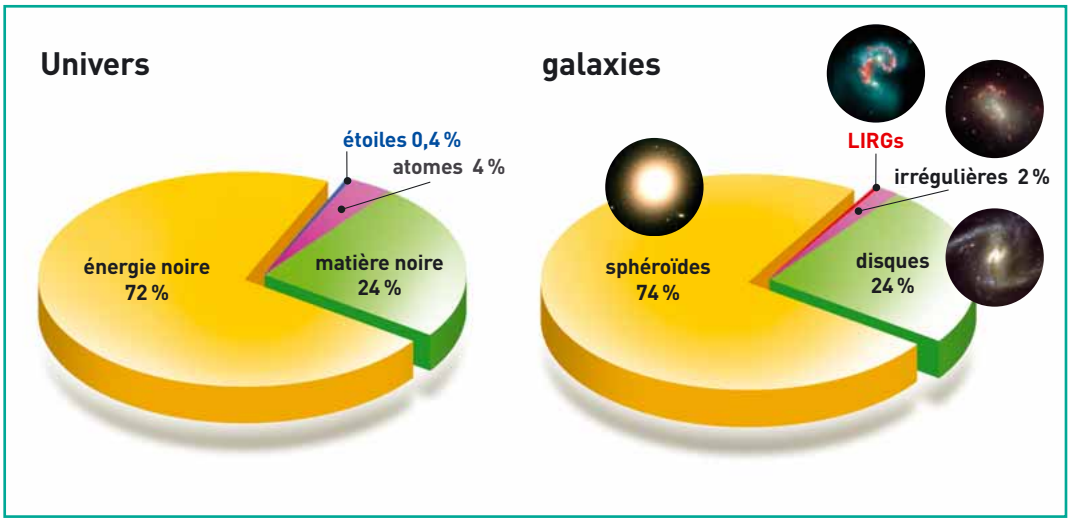


Figure 1. Comparaison de la répartition des composantes énergétiques de l'Univers (à gauche) et des galaxies en types morphologiques (à droite). Le parallèle est frappant mais rien ne permet à l'heure actuelle d'y voir autre chose qu'une coïncidence.

Énergie noire, « composante rouge » et autres énigmes

Il semble aujourd'hui qu'environ 72 % du contenu énergétique de l'Univers soit de nature encore inconnue (figure 1). Cette **énergie noire** accélère l'expansion de l'Univers et empêche la formation de nouveaux amas de galaxies. À plus petite échelle, dans les galaxies, on constate que dans près de 74 % des galaxies (proportion en masse) un mécanisme a empêché l'apparition de nouvelles étoiles. Ces **galaxies elliptiques** ou bulbes de galaxies ont une couleur rouge car leurs étoiles sont vieilles et froides. Si la question de la nature de l'énergie noire est devenue l'un des enjeux majeurs de l'astrophysique, il en est de même pour la quête du mécanisme qui a provoqué la mort prématurée des galaxies rouges.
Autre énigme : sur les 4 % de matière baryonique[3], c'est-à-dire d'**atomes**, qui participent au contenu énergétique de l'Univers, seul un dixième (donc 0,4 % du total) appartient à des étoiles. La formation d'étoiles dans les galaxies a donc été un processus remarquablement inefficace. Pourquoi la plupart (90 %) de la matière baryonique est-elle restée sous la forme de gaz ? Pourquoi ce gaz, pourtant supposé être attiré par les galaxies, ne tombe-t-il pas dans les sphéroïdes (voir *La morphogenèse des galaxies*, p. 60) pour y faire naître de nouvelles étoiles ?

Matière noire et formation des galaxies

Une galaxie est globalement une structure constituée de gaz, d'étoiles et d'un **halo** de **matière noire**. La matière noire produit l'effet inverse de celui de l'énergie noire. Elle accélère la formation des structures dans l'Univers. Elle peut être considérée comme un bol dans lequel la soupe de matière baryonique est maintenue bien au chaud. Elle-même ne rayonne pas, mais elle participe à la croissance des structures par l'effet de sa force **gravitationnelle**.
Sans elle, nous ne saurions pas expliquer l'origine des galaxies, car la quantité de matière standard n'est pas suffisante pour décrire la formation des galaxies. Encore aujourd'hui, près de 24 % de la matière contenue dans les **disques** de galaxies continue de donner naissance à des étoiles. Ces régions se distinguent par leur couleur bleue qui indique la présence d'**étoiles** jeunes, **massives** et chaudes, par opposition aux galaxies elliptiques, composées uniquement d'étoiles vieilles et froides. La répartition de la matière dans les galaxies en composantes bleue (disques, 24 %) et rouge (sphéroïdes, 74 %) rappelle celle à plus grande échelle observée dans l'Univers entre matière noire (24 %) et énergie noire (72 %) (figure 1). Il ne s'agit que d'une analogie quantitative, sans lien physique, mais elle rappelle aussi qu'aux deux échelles, l'Univers semble aujourd'hui dominé par des forces qui s'opposent à la formation de nouvelles générations d'étoiles.

Des étoiles à profusion

Une minorité de galaxies présente une morphologie moins tranchée que les autres : les **galaxies irrégulières**. Les Nuages de Magellan, tout proches de la Voie lactée, en sont un bon exemple. Il existe une composante encore plus minoritaire, mais particulièrement intéressante pour les astrophysiciens : les « galaxies lumineuses dans l'infrarouge » ou LIRGs. Alors que la très grande majorité des galaxies de l'Univers local génère des étoiles à raison de quelques soleils par an, voire moins, les LIRGs vivent des « flambées de formation d'étoiles », engendrant plusieurs dizaines voire centaines de **masses solaires** par an.
Il a fallu observer le ciel dans l'**infrarouge lointain** pour découvrir ces flambées de formation d'étoiles restées invisibles jusqu'alors. En effet, les étoiles massives ne vivent pas assez longtemps pour sortir du nuage **moléculaire** géant qui leur a donné naissance, et leur lumière visible et ultraviolette est **absorbée** par la poussière du nuage. Cette dernière, chauffée, rayonne à son tour dans l'infrarouge lointain[4]. Le

(3) Matière baryonique : le terme « baryon » vient du grec *barys* qui signifie « lourd ». Théoriquement ce terme désigne les particules lourdes, principalement les **protons** et les **neutrons**, mais il est utilisé en **cosmologie** pour désigner la matière standard – qui comporte les protons et les neutrons (constituants des **noyaux atomiques**), mais aussi les **électrons** - donc les atomes d'une manière générale. On la distingue de la matière « non baryonique », principale composante (supposée) de la matière noire. Les particules non baryoniques restent à découvrir. Elles ne seraient sensibles qu'à l'**interaction gravitationnelle**, ce qui expliquerait pourquoi elles n'obéissent pas à la même physique que les particules baryoniques et donc ne rayonnent pas de lumière.

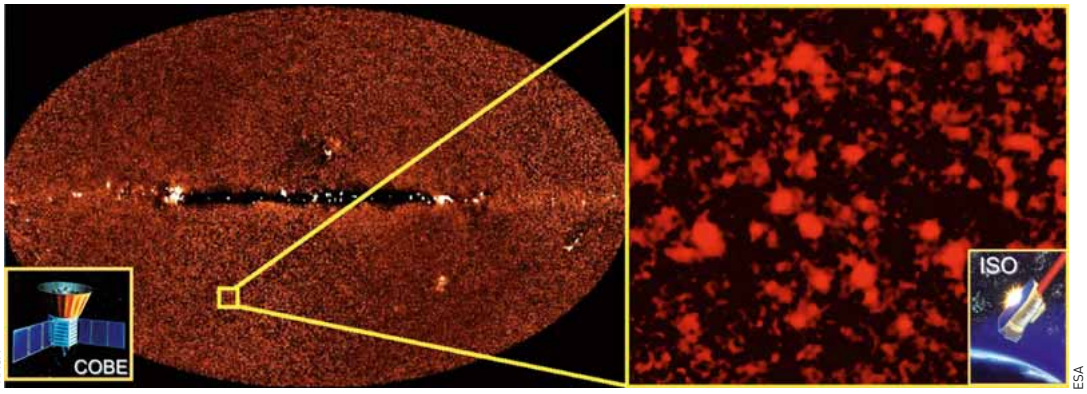


Figure 2.
Le fond diffus infrarouge mesuré par le satellite de la NASA COBE (à gauche) et sa résolution en galaxies individuelles par le satellite de l'ESA ISO (à droite).

satellite infrarouge américain IRAS (*InfraRed Astronomical Satellite*, 1985, miroir de 57 cm de diamètre) a donc découvert les LIRGs, qui seraient probablement restées anecdotiques sans l'envoi par l'**ESA** du satellite ISO (*Infrared Space Observatory*, 1995, miroir de 60 cm) avec à son bord la caméra ISOCAM, réalisée sous la maîtrise d'œuvre du CEA. À la fin des années 1990, une équipe française de l'**Institut d'astrophysique spatiale** (à Orsay) découvrait, grâce au satellite américain COBE (*COsmic Background Explorer*), l'existence d'un fond de lumière en infrarouge lointain, différent du fond diffus cosmologique. Il résultait sans doute de l'accumulation de la lumière rayonnée par la poussière, chauffée par les étoiles massives sur toute l'histoire de l'Univers. De façon quasi simultanée, une équipe française du CEA identifiait les galaxies individuelles ayant produit ce fond diffus, grâce à la caméra ISOCAM. Les astrophysiciens venaient ainsi de découvrir que les LIRGs, anecdotiques dans l'Univers local, ont en fait joué un rôle majeur dans le passé (figure 2). Ce résultat a été récemment confirmé avec le satellite de la **NASA** Spitzer (2004, miroir de 85 cm) et les scientifiques savent aujourd'hui que dans le passé, les galaxies formaient des étoiles à des taux faramineux, pouvant atteindre le millier de masses solaires par an.

Encore une contradiction

En combinant ces observations à celle des mesures des distances des galaxies grâce à leur **décalage spectral** (voir *À la recherche des grands ancêtres*, p. 52), il devenait possible de remonter le cours de l'histoire de la formation d'étoiles dans les galaxies (figure 3). Les données en infrarouge montrent qu'après avoir augmenté pendant le premier quart de l'âge de l'Univers[1], le taux annuel de formation d'étoiles a ensuite brusquement chuté. Cette mesure s'accorde parfaitement avec celle de la proportion d'étoiles nées au cours du temps, obtenue en mesurant la masse totale d'étoiles dans les galaxies de différentes époques. Ces deux manières d'appréhender le même phénomène suggèrent que la proportion d'étoiles créées au cours du temps est pratiquement égale à la fraction de l'âge de l'Univers. Or, il a été montré par ailleurs que le rôle des LIRGs a été dominant au cours de la majorité de l'histoire de l'Univers – ce qui reflète

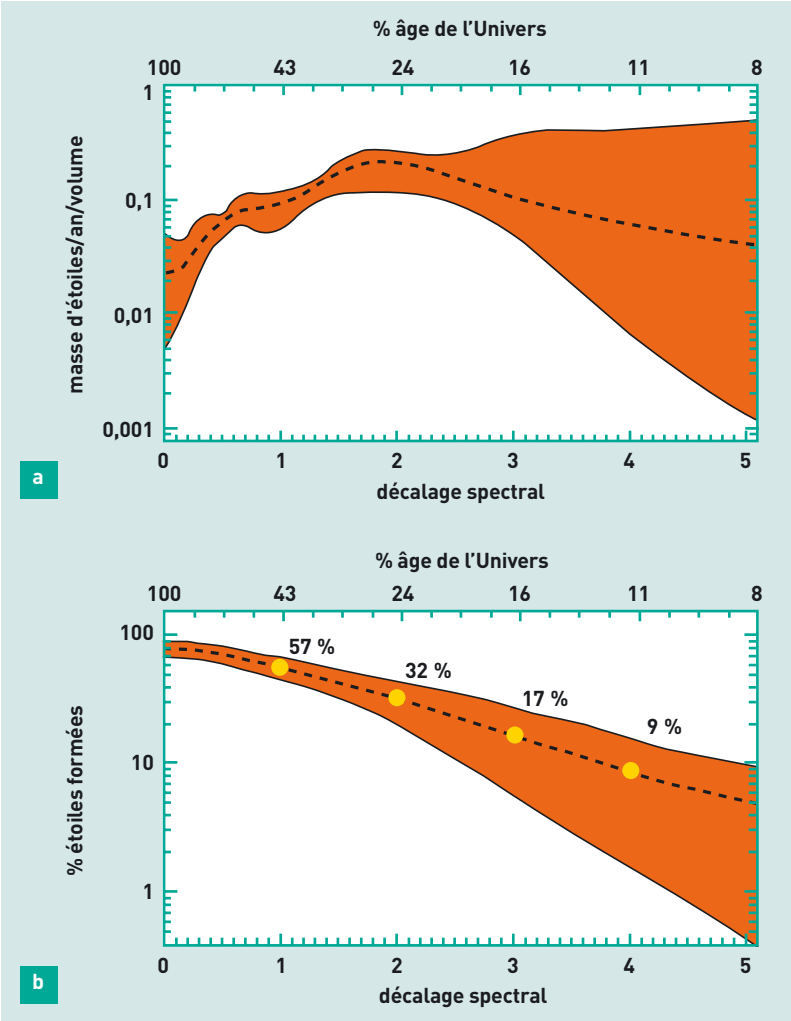
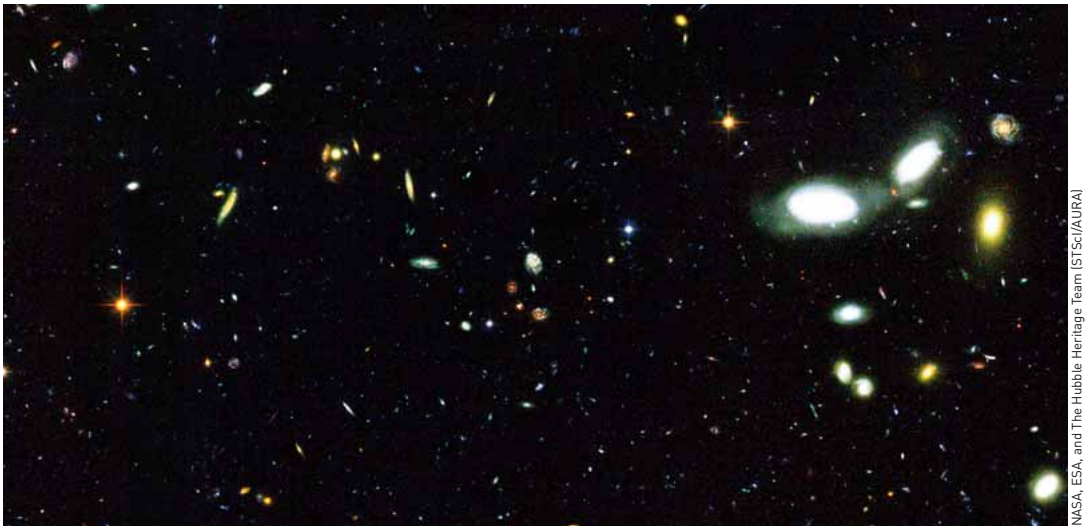


Figure 3.
La courbe du haut montre l'intensité de la formation des étoiles dans l'Univers au cours du temps. Elle se mesure en masse d'étoiles (en unité de masses solaires) formée par année dans un volume donné (ici des « boîtes » de 3 millions d'années-lumière de côté). Cette intensité était maximale quand l'Univers avait près de 30 % de son âge actuel (axe horizontal du haut). La figure du bas retrace la proportion d'étoiles nées au cours du temps dans l'Univers (par rapport à la quantité d'étoiles actuelle). Cette quantité peut être calculée soit à partir de la figure du haut, soit par des observations directes, en additionnant la masse d'étoiles contenue dans les galaxies lointaines de l'Univers. Les deux méthodes donnent le même résultat.

(4) Par ailleurs, une étoile dix fois plus massive que le **Soleil** rayonne 10 000 fois plus que lui et, du coup, termine son existence 10 000 fois plus tôt. C'est pourquoi la mesure de l'activité de formation d'étoiles des galaxies repose sur celle de leur quantité d'étoiles massives, puisque la durée de vie de ces dernières est si courte (quelques dizaines de millions d'années) que lorsque les astronomes en observent, ils savent qu'elles sont nées depuis peu de temps.



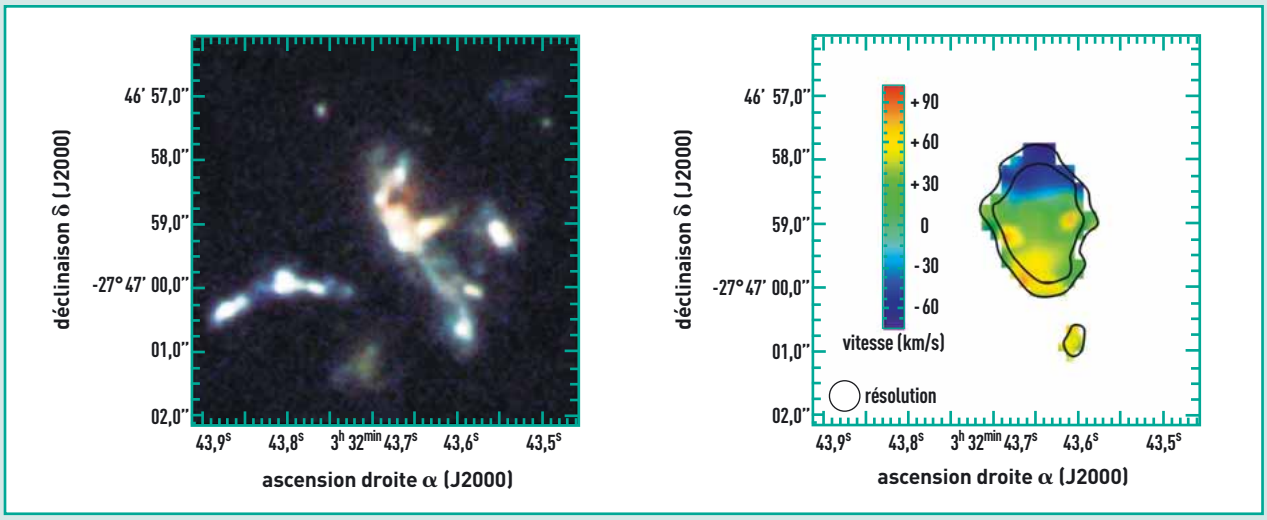
NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

Figure 4.
Image profonde du ciel réalisée avec la caméra ACS du satellite spatial Hubble, dans l'hémisphère Sud (région appelée GOODS pour *Great Observatories Origins Deep Surveys*). Couvrant une "surface" apparente équivalente au dixième de celle de la Lune (ou du Soleil), l'image révèle toute une palette de formes galactiques.

La morphogenèse des galaxies

Les **galaxies** de l'Univers actuel se répartissent en deux principaux types morphologiques. Les **galaxies *spirales*** sont des disques d'**étoiles** et de gaz interstellaire en rotation autour d'un petit **bulbe** central. La **gravité** dessine peu à peu les bras spiraux. À l'opposé, les **galaxies *elliptiques*** n'ont pas de disque en rotation. Elles prennent la forme de sphéroïdes, dans lesquels les mouvements désordonnés des étoiles s'opposent à la gravité et empêchent la formation de structures internes.

Ces deux types de galaxies résultent de deux processus de formation différents. Pour appréhender ces mécanismes, les astronomes captent la lumière des galaxies lointaines, donc anciennes, à l'aide de grands instruments au sol et dans l'espace, notamment le VLT (*Very Large Telescope*) au Chili et le télescope spatial Hubble. Ils ont ainsi constaté que la morphologie des galaxies a fortement évolué au cours de leur formation. Lorsqu'elles étaient deux ou trois fois plus jeunes qu'aujourd'hui, les galaxies spirales avaient des formes beaucoup plus irrégulières. Elles comportaient certes un disque en rotation, mais beaucoup moins homogène et sans bulbe central. Souvent même, le disque apparaît fragmenté en quelques grandes condensations de gaz et d'étoiles. Ces « proto-spirales » – galaxies **primordiales** qui deviendront des spirales – sont de larges disques en rotation ayant **accrété** de grandes quantités de plus petites galaxies et de gaz intergalactique. Leur masse est telle qu'elles sont devenues **gravitationnellement** instables, les forces de gravité dépassant les forces de pression et d'inertie. Cette instabilité entraîne une fragmentation. Chaque fragment contient du gaz très dense formant des étoiles à un taux très élevé : plusieurs dizaines de **masses solaires** par an. Par la suite, les parties internes de ces fragments migrent vers le centre de la galaxie et y forment un petit bulbe sphérique. Le reste de la matière est redistribué dans un disque, maintenant stable gravitationnellement, et qui prend progressivement la forme spirale observée aujourd'hui (figure 1).



F. Bournaud/CEA/NASA/ESO

Figure 1.
Une galaxie de l'Univers jeune (UDF 6462, $z = 1{,}57$) observée par le télescope spatial Hubble (à gauche). La **spectroscopie** au *Very Large Telescope* (**ESO**) révèle son champ de vitesse (à droite). Les régions s'approchant de nous sont en bleu et celles s'éloignant en jaune-orange. Malgré sa forme très irrégulière, cette galaxie est une future galaxie spirale surprise en pleine phase d'assemblage de son disque et de son bulbe central.

le fait que toutes les galaxies actuelles ont vécu dans le passé une phase où elles généraient des étoiles à un rythme très important. Ces deux constats peuvent paraître contradictoires puisque les LIRGs sont le siège de flambées de formation d'étoiles, alors qu'en moyenne l'Univers semble produire ses étoiles de manière continue, sans soubresauts.

Pour comprendre ce qui a pu se passer, il faut changer de lunettes et retourner à l'image visible du ciel afin d'étudier l'évolution morphologique des galaxies (voir *La morphogenèse des galaxies*, p. 60). Des images profondes du télescope spatial Hubble ont permis non seulement de détecter des galaxies lointaines, mais aussi d'en étudier la forme et la morphologie sur de longues périodes (figure 4). Tandis que les LIRGs de l'Univers proche présentent toutes une morphologie très « chahutée », indice de fusion galactique, les LIRGs distantes ressemblent plus à la Voie lactée : ce sont de belles galaxies spirales bien contrastées. Les astrophysiciens ont découvert très récemment que le rôle des fusions de galaxies au cours de l'histoire de l'Univers n'a pas été aussi important qu'ils l'ont d'abord cru. Si les galaxies aux flambées de formation d'étoiles les plus extrêmes résultent probablement d'épisodes de fusion, la majorité de l'activité des galaxies n'est pas profondément sensible à ces phénomènes. Un autre mécanisme, encore indéterminé, semble jouer le rôle de premier plan. Deux candidats sont actuellement considérés. Largement négligés dans le passé, ils pourraient bien se révéler des acteurs majeurs de l'histoire cosmologique des galaxies, tant pour allumer la formation d'étoiles que pour provoquer son extinction. Il s'agit de l'**accrétion** de gaz intergalactique sous la forme de filaments et de la formation des trous noirs supermassifs au centre des galaxies. Il faudra attendre les prochaines générations d'instruments pour en savoir plus.

> David Elbaz
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Des chocs féconds

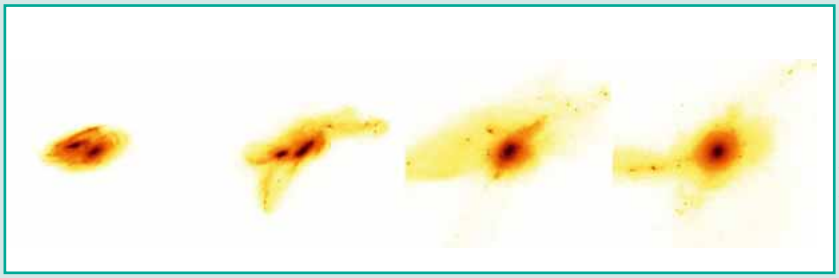
Une galaxie spirale se forme donc essentiellement par l'évolution interne : instabilité et fragmentation d'un disque primordial riche en gaz. À l'inverse, une galaxie elliptique n'acquiert pas sa forme par la seule évolution interne d'un système. Il faut un processus plus violent pour détruire l'organisation des disques en rotation, et les transformer en sphéroïdes. Il s'agit des collisions et fusions de galaxies. Lorsque deux galaxies de masses voisines, généralement spirales, entrent en collision, elles expulsent une partie de leur masse sous l'effet des **forces de marée** mais l'essentiel de leur matière fusionne en une seule galaxie. Ce processus est appelé « relaxation violente » car les forces gravitationnelles varient très rapidement (par rapport à la période orbitale de chaque étoile). Il en résulte une désorganisation à la fois de la morphologie (disque) et de la cinématique, si bien que la galaxie résultante acquiert spontanément les propriétés d'une elliptique. Des **simulations numériques** ont démontré que la fusion de deux galaxies crée bien un objet totalement comparable aux véritables galaxies elliptiques (figure 2). Les propriétés de l'Univers à grande échelle et de la **matière noire** contrôlent la fréquence de chaque processus, et notamment le taux de collisions entre galaxies. Expliquer les proportions de galaxies spirales et elliptiques dans notre Univers actuel reste donc un des grands défis pour les **modèles** cosmologiques de formation des structures.

ESO

Une galaxie elliptique (NGC 1316).

ESO

Une galaxie spirale (NGC 6118).



F. Bournaud/CEA/CCRT

Figure 2.
Simulation numérique d'une collision de deux galaxies spirales. Les deux galaxies fusionnent, leurs disques sont détruits, et il en résulte une galaxie de type elliptique.

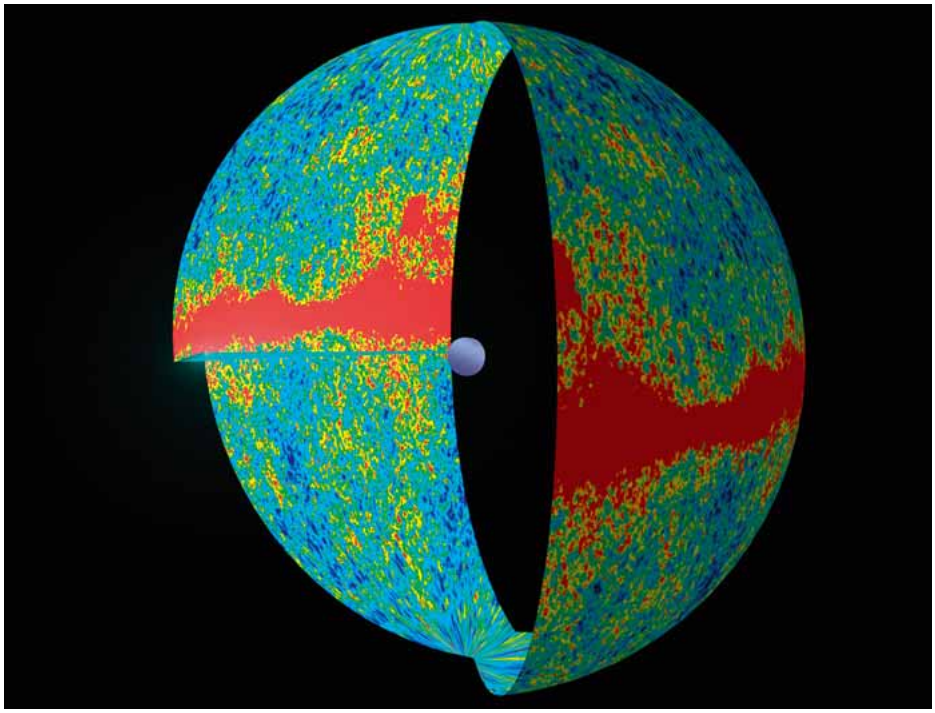
> Frédéric Bournaud
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles
(CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Une gigantesque toile d'araignée. C'est ainsi que se présente aujourd'hui l'Univers. Essentiellement vide et froid, il est peuplé de galaxies concentrées le long de filaments aux croisements desquels se trouvent les plus gros objets connus : les amas de galaxies. Comment une structure aussi définie a-t-elle pu apparaître ? Le rayonnement fossile datant des premiers âges de l'Univers montre au contraire une « soupe » chaude, dense et homogène dans toutes les directions. D'infimes variations locales de densité auraient donné naissance aux futurs objets, principalement par le jeu de la gravité ralentie par l'expansion. Le moteur de cette évolution est la force de gravité qui conduit la fameuse matière noire, toujours mystérieuse, à s'effondrer dans de grandes structures filamentaires où la matière « ordinaire » est à son tour entraînée. Étonnamment, alors que tant de questions demeurent ouvertes, celles de la forme et de la finitude de l'Univers pourraient recevoir rapidement des réponses.

L'**Univers**, une **« soupe » homogène** devenue une **structure hiérarchisée**

La grande histoire thermique de l'Univers

La révélation du fond diffus cosmologique a donné naissance à une nouvelle discipline : la cosmologie observationnelle. Depuis le satellite COBE, des données observationnelles peuvent enfin corroborer les modèles théoriques d'évolution de l'Univers. Les cosmologues projettent maintenant de nombreuses expériences pour affiner le scénario.



Vue d'artiste des observations, par le satellite Planck, du fond diffus cosmologique, ce rayonnement fossile dans le domaine des micro-ondes qui baigne tout l'Univers. Dans cette image, la Terre est placée au centre de la sphère céleste. Le satellite, à chaque rotation, observe (peint) sur la sphère céleste la carte du fond diffus cosmologique.

C. Carreau/ESA

Aujourd'hui, les astronomes observent un Univers raréfié, froid et transparent à la lumière. Essentiellement constitué de grands vides, il ne comprend en moyenne que quelques **atomes** par mètre cube. À l'ombre du rayonnement des astres brillants, la température du rayonnement ne dépasse pas 2,763 **K**, soit environ -270 °C. Enfin, l'Univers est en expansion : dans toutes les directions, les **galaxies** lointaines s'éloignent les unes des autres.

Il n'en a pas toujours été ainsi. Un observateur imaginaire remontant le temps verrait l'Univers se contracter, et devenir plus dense, « se compresser ». Un physicien sait que lorsque l'on compresse de la matière, sa température augmente. Il en est de même pour l'Univers : il y a 13 milliards d'années, sa densité était telle que sa température atteignait celle de la surface du **Soleil**. Dans ces conditions, la matière ne se présente plus sous forme d'atomes mais de **plasma**, sorte de « soupe » de **photons**, de **noyaux** et d'**électrons** sans atomes. Une « soupe » certes très brillante car très chaude, comme le Soleil, mais complètement **opaque**. Les photons diffusent en effet incessamment sur les **électrons libres** d'un plasma et ne peuvent le traverser.

Au cours du temps, l'Univers s'est donc dilaté et refroidi. À un moment donné, la température est devenue tellement basse que les photons n'avaient plus assez d'énergie pour **ioniser** les atomes. Les électrons se sont alors recombinés avec les noyaux pour créer des atomes. Les **cosmologues** appellent cet événement la *recombinaison*. Assez brutalement, l'Univers est devenu transparent aux photons. Depuis lors, ceux-ci se propagent en ligne droite et forment le fond diffus cosmologique **micro-onde** (FDCM), appelé également rayonnement fossile. Le fond diffus cosmologique, autour de 100 **GHz**, constitue donc une photo de l'Univers **primordial**, tel qu'il était à l'âge de 380 000 ans, au moment du « découplage électrons-photons » (figure 1).

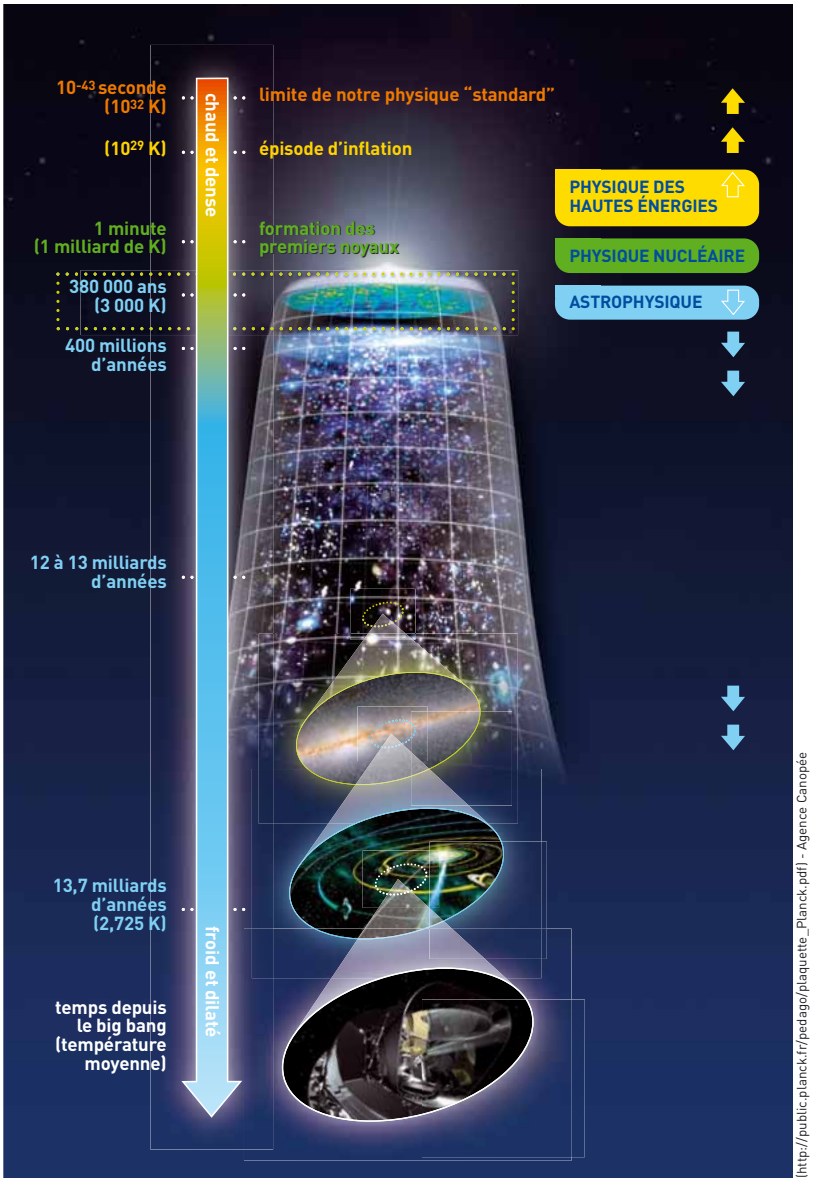


Figure 1.
Cette figure résume en une image ce que savent les physiciens de l'histoire thermique de l'Univers.

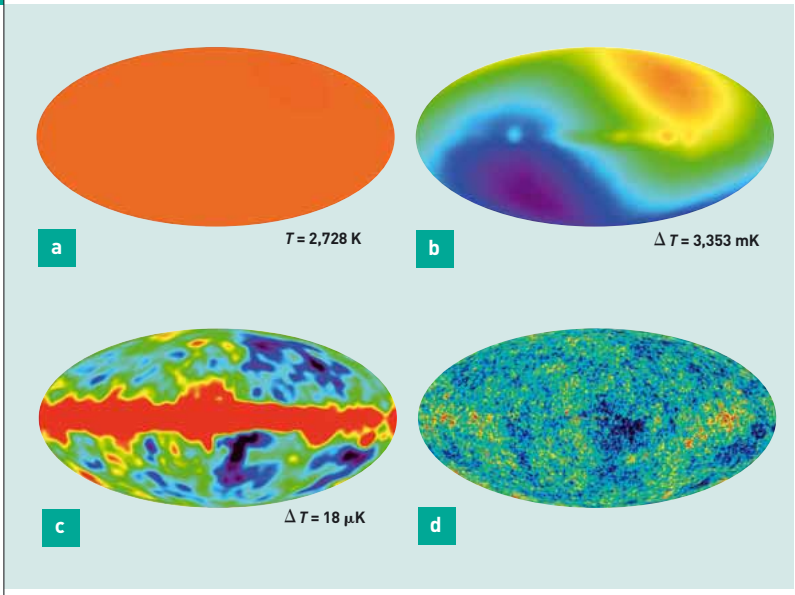
Une « photo » pleine d'enseignements

Au premier regard sur cette image, le ciel semble briller uniformément : c'est ce que les Américains Arno A. Penzias et Robert W. Wilson[1] ont découvert en 1965, au moyen d'antennes radio, et que les cosmologues appellent maintenant le « monopôle » du FDCM (figure 2a). L'Univers primordial était donc extrêmement homogène. Un regard plus attentif, soustrayant la brillance moyenne de la carte du ciel, laisse apparaître une carte où dominent un point chaud et un point froid (la « composante dipolaire » du FDCM), plus de petites structures correspondant au rayonnement des poussières « chaudes » (environ 20 K !) de la **Voie lactée** (figure 2b). La composante dipolaire, conséquence du mouvement de la Terre, n'apporte pas d'information sur l'Univers primordial. Après soustraction de cette composante dipolaire, et quatre années de mesures, le satellite COBE (*COsmic Background Explorer*) a pu révéler les minuscules variations de brillance du FDCM primordial[2] (figure 2c). La bande rouge centrale correspond à l'émission des poussières du plan galactique, qui saturent complètement l'image. Plus récemment, le satellite WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) a encore affiné cette carte du ciel, donnant une image où la composante galactique est soustraite et les couleurs correspondent à des variations de température apparente de l'ordre de 50 **µK** – alors que la température moyenne est de 2,763 K (figure 2d).

L'extraordinaire homogénéité en brillance de la carte de COBE souligne donc que l'Univers était extrêmement homogène en température, et donc en pression, au moment du découplage. Les détails infimes, sur la carte de WMAP, sont des variations locales de température apparente, et donc de pression, du plasma à ce moment. Si minimes soient-elles, ces variations ont donné naissance aux grandes structures de l'Univers : galaxies, **amas de galaxies** et filaments.

(1) Les Américains Arno A. Penzias et Robert W. Wilson ont obtenu le prix Nobel de physique en 1978 pour cette découverte.

(2) Les Américains John C. Mather et George F. Smoot ont obtenu le prix Nobel de physique en 2006 pour cette découverte.



NASA

Figure 2.
Cartes du ciel montrant les structures du fond diffus cosmologique à différents niveaux de détails.

Modéliser l'Univers primordial

Personne ne peut témoigner de l'histoire de l'Univers aux époques primordiales. Aussi, les cosmologues ont-ils recours à des **modèles**. Ils imaginent un scénario qui, obéissant aux lois de la physique constatées sur Terre, reproduit autant que possible toutes les observations disponibles de l'Univers primordial et de l'Univers récent. La **nucléosynthèse primordiale** apprend par exemple que l'Univers a connu une température supérieure à 10^{10} K, et depuis est en expansion. Or les cosmologues savent mesurer précisément les variations de densité et de pression du plasma au moment du découplage. Ils supposent alors que dans l'Univers très primordial, des mécanismes de physique **quantique** ont produit spontanément des fluctuations de densité aléatoires mais minimes dans le plasma primordial. En utilisant les lois de la mécanique des fluides, ils ont calculé l'évolution de ces fluctuations de densité sous l'action des principales forces en présence : la **gravité** et les forces de pression, essentiellement dues à cette époque au gaz de photons. La photo du FDCM permet enfin de confronter ces modèles à la réalité de l'époque.

La naissance des premiers objets

Après le découplage, les photons du FDCM n'interagissent plus avec les atomes, ce qui supprime les forces de pression engendrées par le gaz de photons. La gravité travaille seule à creuser les surdensités, seulement modérée par la dilution générale du fluide de matière due à l'expansion de l'Univers. Des calculs montrent que, quand un grumeau de matière atteint une densité de 4,6 fois celle du fluide, il ne se dilue plus dans l'expansion de l'Univers mais s'effondre sur lui-même pour former un objet astrophysique : un **halo** de matière. Ce halo, dont la masse est dominée par sa composante de **matière noire**, sera le berceau des futurs objets astrophysiques **brillants** : **étoiles**, puis galaxies naines, qui en fusionnant les unes avec les autres (ainsi que leurs halos) vont former les galaxies, puis les amas de galaxies.

Finalement, le FDCM permet donc d'observer les germes des grandes structures de l'Univers. Mais il y a plus ! Aux longueurs d'onde millimétriques, le monopôle du FDCM forme un écran brillant illuminant tous les objets astrophysiques. Si un photon du FDCM traverse un amas de galaxies, il rencontre un plasma chaud d'une température de quelques dizaines de millions de degrés sur des distances d'un million d'**années-lumière**. Il a alors une probabilité d'environ 1/10 000 de diffuser sur un électron du gaz chaud par **effet Compton**, et de voir ainsi son énergie augmenter. C'est l'effet Sunyaev-Zel'dovich[3]. Pour le détecter, il faut observer le ciel avec une **résolution angulaire** améliorée, et à plusieurs fréquences. Dans la direction d'un amas, aux fréquences inférieures à 220 GHz, la carte du ciel montre une tache froide, correspondant à l'**absorption** des photons du FDCM. En revanche, aux fréquences supérieures, elle présente une tache chaude due à l'effet Sunyaev-Zel'dovich. Cela permet de distinguer un amas de galaxies des inhomogénéités primordiales du FDCM.

La grande traque

Le Service de physique des particules du CEA/Irfu s'est donc engagé dans les expériences en ballon stratosphérique Olimpo (figure 3) et, avec le Service d'astrophysique de l'Irfu, dans le satellite Planck[4] (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90). Ces expériences fourniront deux catalogues complémentaires d'amas de galaxies. Le satellite Planck, lancé en mai 2009, détectera les amas massifs ou proches, et couvrira tout le ciel. L'instrument Olimpo, qui devrait prendre ses premières données en 2010, ne couvrira que 300 degrés carrés du ciel, mais avec une meilleure profondeur.

Or en cosmologie, du fait de la vitesse finie de la lumière, voir loin signifie voir vieux. Ces catalogues

(3) Effet prédit en 1970 par les physiciens soviétiques Rashid A. Sunyaev et Yakov B. Zel'dovich.

(4) Pour en savoir plus sur ce satellite, voir http://public.planck.fr.

Boomerang Team

Figure 3.
Lancement, depuis l'Antarctique, du ballon stratosphérique Boomerang, précurseur de l'expérience Olimpo. La détection du fond diffus cosmologique par Olimpo sera réalisée à l'aide de quatre plans de bolomètres placés au foyer d'un télescope de 2,6 m de diamètre.

d'amas de galaxies retraceront donc la distribution en masse des amas au cours des âges, et permettront aux cosmologues de vérifier si leurs modèles de formation de structures, construits et sélectionnés pour reproduire les mesures des inhomogénéités du FDCM, prédisent bien la bonne abondance d'amas de galaxies dans l'Univers contemporain et au cours du temps… Le croisement de ces données avec celles des autres observations cosmologiques, telles que la distribution de brillance des **supernovae** de type Ia au cours des âges, contribuera à la sélection de modèles cosmologiques valides, et finalement à l'élaboration d'une histoire fiable de la genèse de notre Univers.

Vers un scénario détaillé

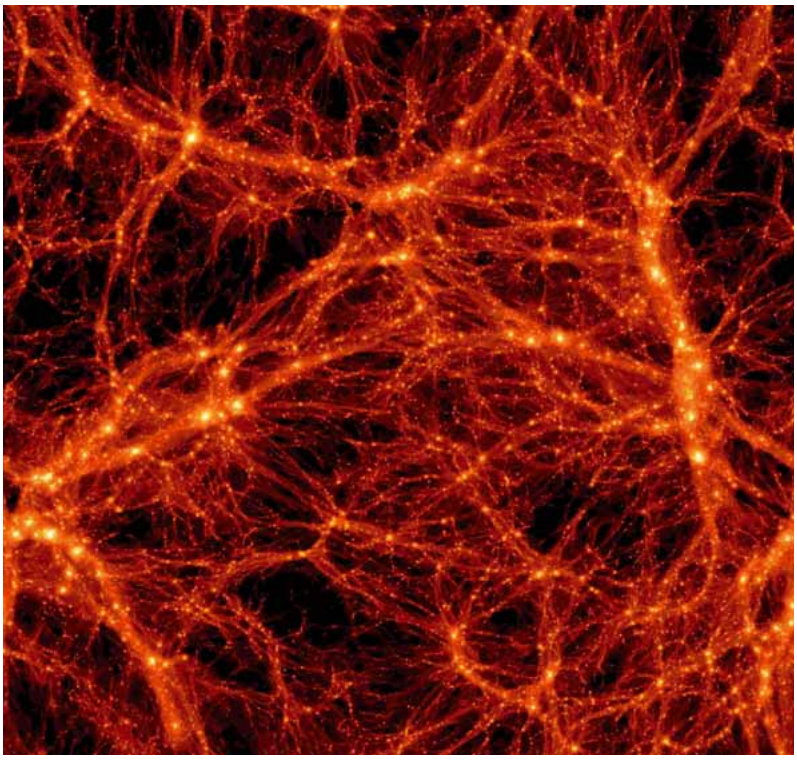
L'avenir des expériences d'observation du FDCM prend deux orientations. À court terme, de nombreuses expériences au sol (*South Pole Telescope, Atacama Cosmology Telescope*…) doivent cartographier le FDCM à très haute résolution angulaire, c'est-à-dire mieux que la **minute d'arc**. Ces expériences nécessitent des miroirs de grande taille (environ 10 mètres) et des technologies de pointe pour les détecteurs (les **bolomètres**). Elles devraient aboutir à la détection de l'essentiel des amas de galaxies dans leur champ d'observation. À plus long terme, les équipes européennes et américaines proposent un satellite pour succéder à Planck – projets BPOL, CMBPOL – et des expériences au sol telles que BRAIN, EBEX et bien d'autres. Tous ces projets ont pour but de mesurer les composantes **polarisées** du fond diffus cosmologique, qui révèleront les mouvements de matière à l'époque de son émission. Ainsi, 17 ans après la publication des premiers résultats de COBE, qui marqua l'acte de naissance de la cosmologie observationnelle, une nouvelle communauté scientifique veut se donner les moyens d'écrire dans tous ses détails le scénario de la formation des grandes structures de l'Univers.

> Dominique Yvon
Service de physique des particules (SPP)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay

La toile d'araignée cosmique

L'Univers, à l'origine pratiquement homogène, est aujourd'hui une structure discontinue (des objets et du « vide ») et hautement hiérarchisée. Les plus gros objets actuels sont les amas de galaxies. Ils constituent l'aboutissement de l'évolution de l'Univers sous l'effet de la gravité.

L'Univers tel que nous l'observons est rien moins qu'homogène. Il présente même une forte organisation hiérarchique : les **étoiles** sont regroupées dans des **galaxies**, qui elles-mêmes s'assemblent pour dessiner une véritable « toile d'araignée » tridimensionnelle. Elles se répartissent en effet sur des nappes délimitant de grandes alvéoles quasiment vides. L'intersection de ces surfaces définit des filaments où se concentrent la plupart des galaxies. Au croisement des filaments eux-mêmes se trouvent les **amas**, vastes concentrations pouvant contenir jusqu'à plusieurs milliers de galaxies.
Comment l'Univers s'est-il ainsi structuré ? C'est une des grandes questions de la **cosmologie**. L'observation du **fond diffus cosmologique** (voir *La grande histoire thermique de l'Univers*, p. 62) montre que l'Univers est constitué à 85 % de **matière noire**, initialement distribuée de façon presque homogène. Les petits écarts à l'homogénéité sont certainement à l'origine des structures observées aujourd'hui, formées essentiellement par la **gravitation** (voir *À la recherche des grands ancêtres*, p. 52). Les zones les plus denses attirent la matière environnante tandis que les zones les moins denses se vident progressivement. L'Univers devient ainsi de plus en plus hétérogène au fil du temps. Cependant son expansion, qui tend à diluer la matière, limite ce processus.



C. Pichon, R. Teyssier 2007

Distribution actuelle de la matière noire dans une région de 100 x 100 x 10 millions de **parsecs** d'un modèle d'Univers simulé dans le cadre du **projet Horizon**.

La matière noire, moteur de l'évolution

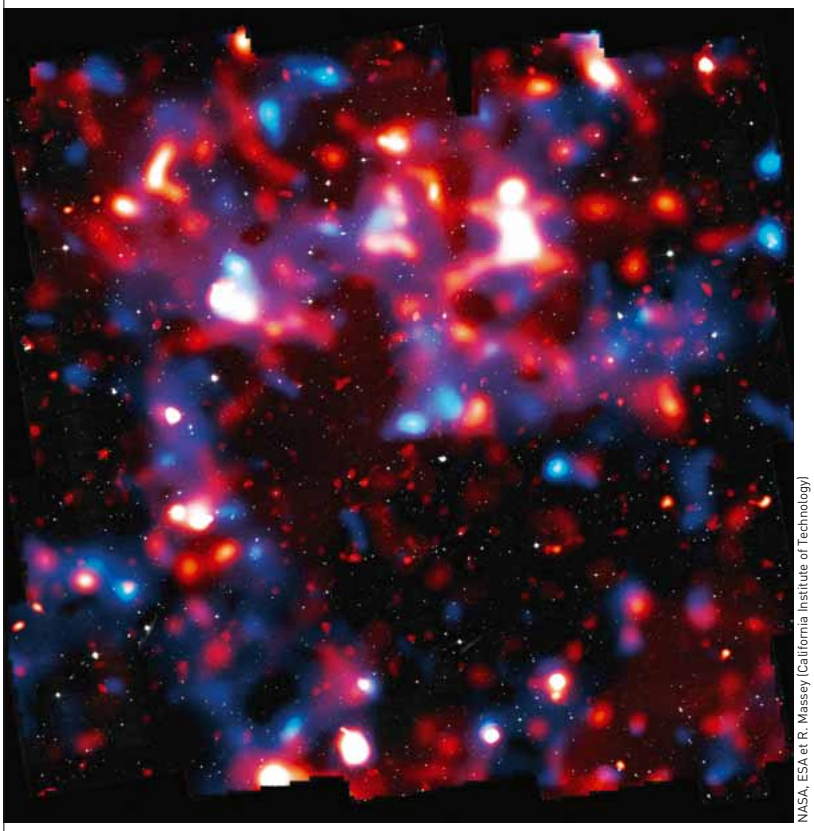
Pour vérifier leur compréhension de la formation des structures, les astrophysiciens confrontent en permanence les prédictions de **modèles** aux observations. Mais cela pose deux problèmes. Les caractéristiques de la distribution initiale de matière noire sont maintenant connues avec assez de précision pour simuler son évolution – sous l'effet de la gravitation dans un Univers en expansion – avec de puissants calculateurs. Il en résulte effectivement une structure à grande échelle semblable à une toile d'araignée. Le premier problème, propre à la **simulation**, tient à la matière visible. L'intuition suggère qu'elle « suive » la concentration de la matière noire et se structure de façon similaire, mais il est ardu de le démontrer. En effet, la formation des étoiles, des galaxies, et l'évolution du gaz intergalactique au sein des structures de matière noire font intervenir des processus très complexes, difficiles à modéliser (voir *Formation des structures de l'Univers : le jeu des modèles*, p. 68). L'autre problème, observationnel, est évidemment la cartographie de la matière noire réelle. Un véritable défi pour les astronomes…

En 2007, une équipe internationale d'astronomes, à laquelle participent des scientifiques du Service d'astrophysique du CEA/Irfu a pourtant publié la première cartographie tridimensionnelle de l'ensemble de la matière, lumineuse et noire, dans une portion du ciel. Il s'agit en l'occurrence du champ COSMOS, une région grande comme environ neuf fois la surface apparente de la Lune. Les astronomes ont utilisé l'**effet de lentille gravitationnelle** pour mesurer indirectement la distribution de la matière noire à grande échelle (avec le télescope spatial Hubble). La distribution de la matière visible, elle, était mesurée par des instruments au sol, comme le télescope japonais Subaru à Hawaii, le VLT (*Very Large Telescope*) au Chili et le CFHT (télescope Canada-France-Hawaii), et dans l'espace par l'observatoire XMM-Newton (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90) ; figure 1. Pour la première fois, des cartes ont été obtenues pour différentes distances, et donc différents âges de l'Univers. Elles montrent que la distribution de matière noire évolue dans le temps en accord avec les lois de la **gravité**. Les diverses composantes de la matière visible sont distribuées à l'intérieur de structures définies par la densité de la matière noire. Ces résultats confirment le modèle cosmologique qui prédit que la formation des structures de l'Univers est dominée par la dynamique de la matière noire.

Les nœuds de la toile cosmique

Le modèle de formation des galaxies et des amas de galaxies, au sein des grandes structures, repose sur le concept d'« effondrement hiérarchique » (voir *La grande histoire thermique de l'Univers*, p. 62). Quand un grumeau de matière devient suffisamment dense, il s'effondre sur lui-même, se découplant de l'expansion[1]. Les petites surdensités s'effondrent d'abord, aboutissant à la formation des premières étoiles et galaxies. Les premiers groupes de galaxies apparaissent plus tard, vers un décalage spectral[2] d'environ 2. Depuis cette époque, les amas se forment et grossissent par **accrétion** continue de matière environnante, et par fusion occasionnelle d'amas entre eux. Les amas de galaxies sont ainsi la manifestation la plus récente de cette formation hiérarchique des structures. Situés au croisement des filaments cosmiques, ce sont les plus grands « objets » de l'Univers, c'est-à-dire les structures les plus massives découplées de l'expansion. Leur composition reflète celle de l'Univers dans son ensemble : 85 % de matière noire et 15 % de matière visible. Cette dernière est essentiellement constituée de gaz chaud (plusieurs dizaines de millions de degrés) observable en **rayons X**. Les galaxies observées en **lumière visible** forment moins de 3 % de la masse totale.

Comment les amas eux-mêmes ont-ils évolué ? L'observation en rayons X avec les observatoires modernes tels que XMM-Newton et Chandra a joué un rôle central dans les progrès récents dans ce domaine. XMM-Newton, avec sa très grande surface collectrice, peut détecter et étudier des amas lointains. Une équipe du CEA, dirigeant le



NASA, ESA et R. Massey (California Institute of Technology)

Figure 1.
Image montrant les trois composantes observées avec le relevé COSMOS : la matière noire (en bleu), la matière lumineuse en rayons X vue par XMM-Newton (en rouge) et les étoiles et galaxies observées en lumière visible avec le télescope spatial Hubble (en blanc).

(1) L'Univers étant en expansion, les particules et objets s'éloignent tous les uns des autres. Sauf au sein d'un « objet », où la gravitation maintient les parties ensemble malgré l'expansion générale.

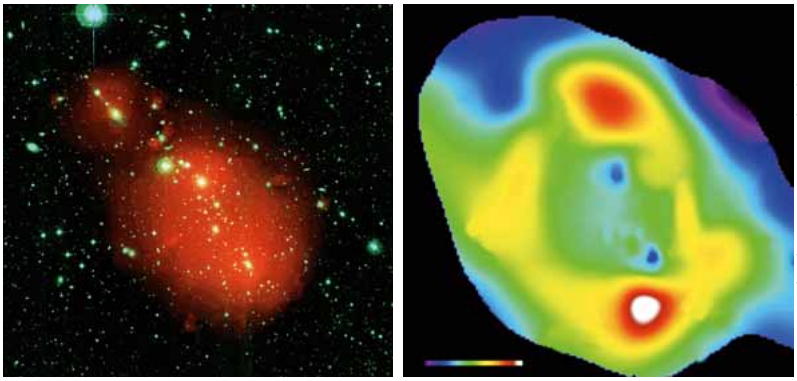
(2) Puisque l'Univers est en expansion, les sources lumineuses s'éloignent de l'observateur, et leur fréquence détectée semble diminuer avec le temps. Le **spectre d'émission** d'un objet est donc d'autant plus décalé vers les basses énergies qu'il est éloigné (c'est-à-dire que sa lumière est ancienne). Ce décalage spectral, noté *z*, donne une mesure de l'âge de l'objet émetteur.

programme « Sondage de la structure à grande échelle avec XMM », a ainsi découvert de nouveaux groupes et amas de galaxies à des distances de plusieurs milliards d'**années-lumière**. L'amas le plus lointain connu à ce jour, XMMXCS 2215-1738, observé quand l'Univers avait un tiers de son âge actuel, a aussi été découvert avec XMM-Newton. Ces observatoires permettent non seulement de faire des images, c'est-à-dire de cartographier la distribution de densité du gaz, mais aussi de déterminer le **spectre** d'émission X en chaque point de l'amas, et donc d'établir une carte de température précise. Les astrophysiciens ont ainsi pu calculer comment la pression du gaz diminue du centre à la périphérie de l'amas. Quand ce dernier est à l'équilibre, les forces de gravitation dues à la matière noire contrebalancent la pression du gaz. Observant un échantillon d'amas à l'équilibre, des équipes du CEA et du **Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik** (**MPE**) ont constaté que la distribution de la matière noire s'accorde remarquablement avec les prédictions des simulations numériques de formation des amas. Plus étonnant : ces observations donnent même des informations sur la nature de la matière noire. La distribution est en effet très piquée (étroite) au centre, ce qui exclut les modèles où les particules de matière noire interagissent fortement par des processus autres que la gravitation.

Une matière visible... mais incomprise

Si la formation et l'évolution des amas en tant que grandes structures de matière noire semblent bien comprises, ce n'est pas le cas pour le comportement de la matière visible, beaucoup plus complexe que celui de la matière noire. Les cartes de la température du gaz obtenues avec XMM-Newton et Chandra montrent que certains amas sont bien en train de fusionner (figure 2), conformément au scénario de formation hiérarchique. Elles exposent aussi toute la violence et la complexité de ce phénomène. Lors de la collision, l'énergie cinétique est dissipée en énergie thermique *via* la création d'ondes de choc mais aussi de **turbulences**. Les astrophysiciens constatent, dans certains amas en fusion, une **émission synchrotron** qui révèle la présence de particules **relativistes**. Les ondes de choc et la turbulence servent probablement aussi à l'accélération de ces particules.

Le gaz et la matière noire vont progressivement se stabiliser pour former un nouvel amas à l'équilibre plus massif et plus chaud. Cependant, l'observation de ces amas à l'équilibre montre que l'énergie du gaz est plus grande que prévue. Les astrophysiciens comprennent mal d'où provient ce surplus, différents processus outre la gravité pouvant modifier le bilan thermique du gaz. Celui-ci se refroidit par rayonnement. En revanche, les explosions de **supernovae** et les **noyaux actifs** dans les galaxies peuvent injecter de l'énergie dans le milieu intergalactique. L'évolution du gaz dans les amas est donc affectée par les galaxies. Inversement, l'évolution des galaxies dépend de leur environnement. Elle est différente pour les galaxies d'amas et pour les galaxies isolées.



J.-L. Sauvageot/SAp/CEA - S. Maurogordato/OCA/CNRS

Figure 2.
L'amas de galaxies A2440. L'image composite de gauche montre les galaxies observées en lumière visible avec le télescope de 2,2 mètres de l'ESO – télescope MPG de l'observatoire de La Silla au Chili – (en vert), et le gaz chaud vu en rayons X par XMM-Newton (en rouge). L'image du gaz révèle que cet amas est en fait composé de deux amas plus petits, centrés sur les deux plus grosses galaxies, et d'un troisième groupe en haut à gauche. La carte de température (à droite) indique que les deux amas sont en train de fusionner : les régions plus chaudes (en jaune/rouge) correspondent à une onde de choc générée par leur rencontre.

Questions d'avenir

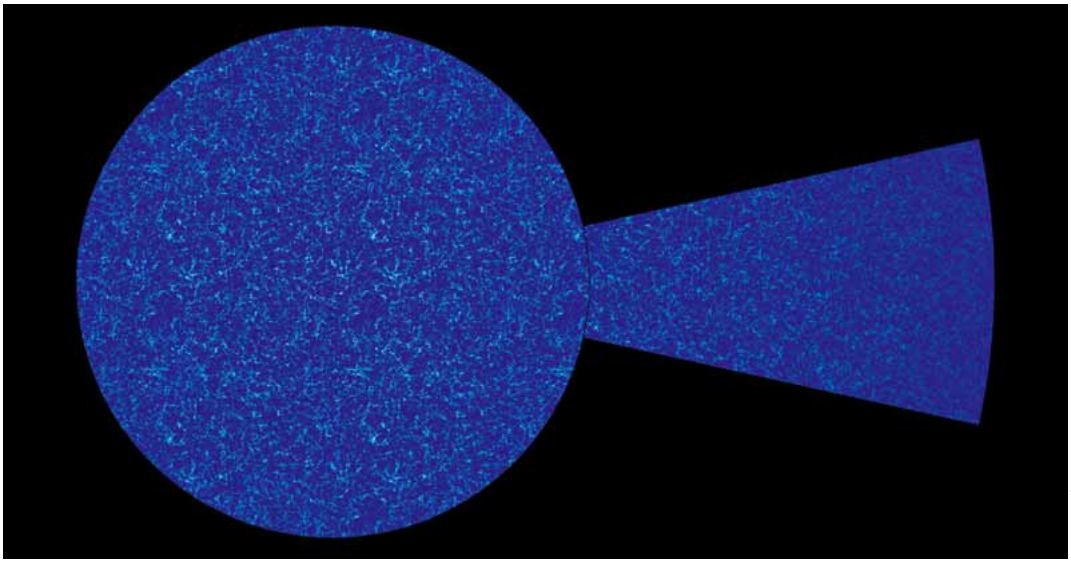
Quel est le rôle des processus autres que la gravité dans la formation des structures de matière visible ? Quelle est l'interdépendance de l'évolution aux différentes échelles, des galaxies aux grandes structures ? Ce sont les principales questions que doivent résoudre les astrophysiciens. L'astronomie en rayons X continuera à jouer un rôle essentiel. Les progrès de nouvelles techniques, comme la mesure de l'**effet Sunyaev-Zel'dovich**, de l'effet de lentille gravitationnelle, ou de l'émission en **infrarouge** des galaxies, permettront de sonder simultanément les amas à plusieurs **longueurs d'onde**, ce qui n'était jusqu'à présent possible que pour de petits échantillons. Le télescope spatial Herschel, lancé avec le satellite Planck par Ariane 5 en mai 2009, éclaircira l'effet de l'environnement sur la formation stellaire dans les galaxies. Le satellite Planck détectera, *via* l'effet Sunyaev-Zel'dovich, l'essentiel des amas massifs sur tout le ciel, qui seront ensuite étudiés en détail avec XMM-Newton (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90). L'observatoire européen en **ondes radio** LOFAR (*LOw Frequency ARray*) permettra de mieux comprendre l'accélération de particules dans les amas de galaxies.

Observer directement l'histoire des amas, depuis la formation des premiers groupes de galaxies, reste cependant hors de portée des satellites en rayons X actuels. C'est un des objectifs principaux des satellites de prochaine génération, comme IXO (*International X-ray Observatory*) proposé dans le cadre du programme *Cosmic Vision* de l'**ESA**. Le projet Euclid, également candidat à ce programme, utilisera la technique des lentilles gravitationnelles pour effectuer un relevé de la matière noire sur la moitié du ciel, et détecter directement les amas en tant que structures de matière noire (voir *Euclid, cartographe du ciel intergalactique*, p. 111).

> Monique Arnaud
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Formation des structures de l'Univers : le jeu des modèles

Ne pouvant mettre l'Univers en laboratoire, les astrophysiciens développent des modèles numériques pour décrire son évolution. Leur résolution s'accroît de génération en génération mais il reste encore bien des mystères, en particulier la nature de la matière et de l'énergie noires.



R. Teyssier/CEA

Cône de lumière représentant la fraction de l'Univers observable, simulée en 2007 par la collaboration Horizon sur l'ordinateur platine du CCRT, le centre de calcul du CEA. Cette simulation de haute performance, qui a pris en compte près de 70 milliards de particules et plus de 140 milliards de mailles, va permettre aux astrophysiciens de prédire quelle est la distribution de matière dans l'Univers avec une précision et un réalisme sans précédent.

Notre vision de l'Univers a beaucoup évolué à travers les siècles. Dans sa *Divine Comédie*, Dante Alighieri (1265-1321) décrit ainsi le cosmos : les **planètes** se déplacent sur des sphères concentriques, appelées mobiles, au centre desquelles se situe la Terre. Les **étoiles** vivent quant à elles sur la sphère la plus externe, nommée *Primo Mobile*. Le voyageur imaginaire dont Dante conte l'histoire découvre qu'au-delà de ce *Primo Mobile* se trouve une grande lumière qui, par l'intermédiaire du *Primo Mobile*, met en mouvement toutes les autres sphères. Cette vision poétique du cosmos pourrait constituer un **modèle** d'Univers médiéval, mais son langage résonne étrangement avec la vision moderne de la **cosmologie**. Au-delà de l'aspect poétique, cette vision s'apparente aussi à un modèle scientifique, dans la mesure où il permet de prédire le mouvement des planètes dans le ciel. Le mouvement rétrograde que certaines d'entre elles avaient le mauvais goût de suivre paraissait contredire le modèle, mais grâce à la théorie des *épicycles*, il fut possible de l'expliquer de façon relativement simple, sans menacer l'ensemble de l'édifice.

Le contenu de l'Univers

Avant de décrire le modèle actuel de l'Univers, il convient de dresser un rapide portrait des objets qui peuplent le cosmos à grande échelle. Les planètes, elles, sont dans notre environnement immédiat. La cosmologie moderne s'attache à décrire la distribution d'objets beaucoup plus grands et lointains : les **galaxies**, et parmi elles, la nôtre, la **Voie lactée**. Ces grands objets majestueux sont composés de centaines de milliards d'étoiles comme le **Soleil**. De couleurs et de formes très variées (**spirales**, **elliptiques**, **irrégulières**), les galaxies se distribuent dans l'Univers selon une structure très caractéristique appelée la toile d'araignée cosmique. Les galaxies se forment et évoluent au sein de ses grands filaments (voir *La toile d'araignée cosmique*, p. 65).

Observant encore plus loin, les astronomes ont découvert ce fameux rayonnement **micro-onde** – le **fond diffus cosmologique** ou rayonnement fossile (voir *La grande histoire thermique de l'Univers*, p. 62) – image de l'Univers lorsqu'il avait 380 000 ans. Cette photographie jaunie d'un Univers en culotte courte est d'une importance primordiale : elle donne accès aux conditions initiales de notre Univers. Qu'y voit l'observateur ? Un ciel essentiellement homogène, avec des fluctuations infimes, d'une amplitude de 1 pour 100 000. L'image appropriée est celle d'un lac tranquille, à la surface duquel l'observateur attentif discerne cependant d'infimes vaguelettes qui la perturbent très légèrement. L'origine de ces fluctuations demeure encore un mystère. La théorie la plus plausible est celle de l'inflation. Elle met en jeu des fluctuations de densité aux échelles **quantiques**, dans l'Univers **primordial**, suivies d'une phase d'inflation qui projette ces fluctuations quantiques aux échelles cosmiques. Il n'en demeure pas moins que les astronomes observent directement ces fluctuations, 380 000 ans après leur origine, lorsque l'Univers devient transparent et lève le voile sur sa vraie nature.

Le big bang... et la suite

Le modèle actuel de formation des structures s'appuie sur la théorie du **big bang**, qui suppose un Univers en expansion décrit par la **relativité générale**. Terme péjoratif utilisé par l'astrophysicien

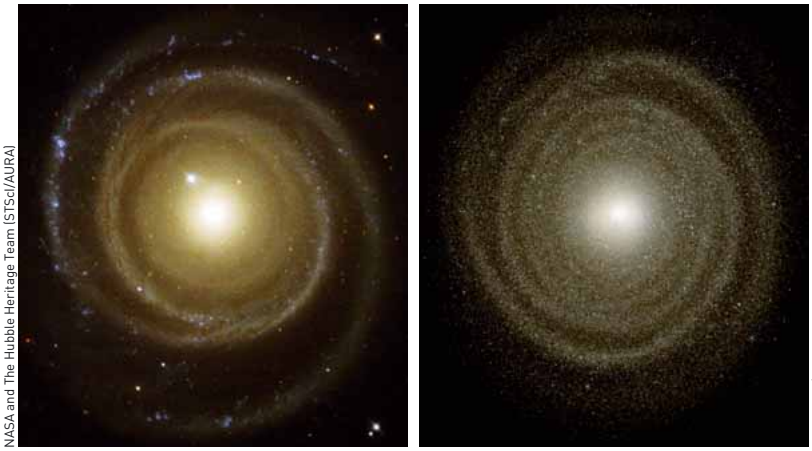
anglais Fred Hoyle pour se moquer de cette théorie, « big bang » est néanmoins devenu le nom « officiel » de la théorie ! Après la singularité initiale, qui joue le rôle du *Primo Mobile* de Dante en initiant l'expansion universelle, l'Univers se dilate et se refroidit, conduisant progressivement à l'apparition des particules et de leurs **interactions**. Ce modèle met en jeu trois composantes principales : la matière ordinaire (l'**atome** et ses constituants) qui ne représente que 4 % de l'énergie totale, la **matière noire** (environ 24 %) et l'**énergie noire** (72 %) ; voir *Formation des galaxies : une histoire paradoxale*, p. 56. Comme leur nom l'indique, la nature de ces deux nouveaux intervenants échappe encore aux physiciens. La matière noire est un fluide autogravitant[1], mais sans collisions, ce qui empêche pour l'instant sa détection[2]. Sa signature **gravitationnelle** fournit néanmoins des preuves indirectes de sa présence. L'énergie noire, elle, est encore un peu plus mystérieuse. Elle a été introduite récemment dans le modèle, pour expliquer la brusque accélération qui semble caractériser l'expansion universelle depuis quelques milliards d'années. Elle pourrait être liée à un nouveau fluide, aux propriétés inédites, et dont l'action ne s'applique qu'à très grande échelle. Il s'agit de deux « points durs » de la théorie actuelle : il n'y a qu'un pas à faire pour les comparer aux fameux *épicycles* du modèle médiéval.

Continuons le film de la formation des structures. Les fluctuations primordiales vont croître sous l'effet de l'instabilité gravitationnelle : pour reprendre l'image du lac, les vaguelettes se transforment petit à petit en une houle qui se creuse, pour devenir finalement, au bout de 100 millions d'années, des vagues déferlantes, provoquant la naissance des premières étoiles. Cette phase d'amplification gravitationnelle s'appelle les *Âges Sombres*, qui prennent fin à l'apparition des premiers objets lumineux. C'est le début de la formation hiérarchique des objets cosmiques. Les premières galaxies à apparaître sont très petites : elles ne contiennent qu'un million d'étoiles. Elles vont ensuite se regrouper pour créer des galaxies plus grosses. Ces dernières vont évoluer, et entrer en collision les unes avec les autres, pour engendrer les galaxies massives qui peuplent l'Univers aujourd'hui, avec parmi elles la Voie lactée.

L'Univers simulé

Le modèle qui permet de décrire cet assemblage hiérarchique des galaxies n'est autre que la mécanique des fluides autogravitants. Il s'agit d'un modèle mathématique relativement simple, mettant en jeu quelques lois de conservation et l'interaction gravitationnelle dans un champ faible[3]. Ce modèle, aussi simple soit-il, rend les calculs analytiques très difficiles à entreprendre. Les équations en jeu sont fortement non linéaires, et font intervenir des phénomènes chaotiques. Or, il est fondamental pour une théorie de pouvoir faire des prédictions quantitatives. Une bonne théorie se doit en effet d'être falsifiable : il faut pouvoir la confronter au réel par le biais de ses prédictions.

Pour calculer les prédictions de ses modèles complexes, la science moderne fait donc appel à l'ordinateur. Le triptyque théorie, simulation et expérience est au cœur de toute activité scientifique : désormais, la science « marche sur trois pattes ». C'est encore plus vrai pour l'astrophysique, qui ne peut évidemment réduire ses objets d'étude à une expérience en laboratoire. Les astrophysiciens n'ont accès au réel que par le biais d'objets très complexes, qui échappent totalement à leur volonté simplificatrice. L'ordinateur joue donc un rôle fondamental de médiation entre la théorie et l'observation. Aujourd'hui, il est possible de **simuler** l'évolution de 70 milliards de pseudo-particules grâce à une utilisation intensive des supercalculateurs (voir l'illustration p. 68). Il est malheureusement toujours impossible de simuler l'ensemble de l'Univers observable avec assez de détails pour accéder à l'échelle des galaxies. Les simulations cosmologiques à grande échelle ne permettent de simuler que la matière noire. Pour pouvoir comparer avec les observations, il est nécessaire de peupler les **halos** de matière noire par des galaxies. Cette étape est généralement réalisée par une démarche phénoménologique, appelée aussi approche semi-analytique, car elle mélange **modélisation numérique** et modélisation analytique. Tout en restant conscient des limites de cet exercice, il faut souligner l'accord spectaculaire entre ce modèle et la distribution réelle des galaxies. L'instabilité gravitationnelle d'une matière noire froide semble donc pouvoir expliquer la formation des structures de l'Univers à grande échelle.



NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

R. Teyssier/CEA

À gauche, image en vraie couleur de la galaxie NGC 4622. À droite, image en vraie couleur d'une galaxie simulée avec le code RAMSES, développé au Service d'astrophysique du CEA/Irfu, dans le cadre du modèle hiérarchique. L'accord entre le modèle et l'observation est excellent.

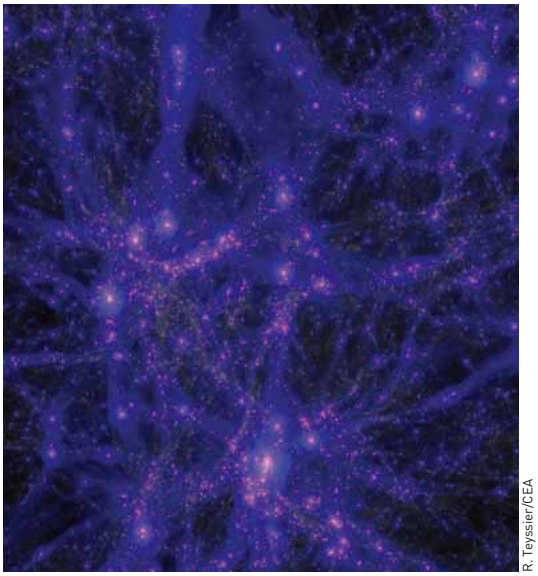
Des questions en suspens

À plus petite échelle, le mystère de la formation des galaxies reste entier. La théorie, élaborée pendant les années 1970, met en jeu le rôle central du rayonnement. Les collisions entre atomes d'**hydrogène** conduisent au refroidissement rapide du **plasma**

(1) Comme la matière ordinaire, la matière noire est sensible à la gravitation qui freine sa dispersion.

(2) Les collisions entre particules provoquent l'émission de **photons**, détectables à distance.

(3) Cette restriction, dite « limite de champ faible », est la condition pour que la théorie newtonienne reste valable. Dans les champs forts (ou non statiques), il faut utiliser la théorie d'Einstein (relativité).



R. Teyssier/CEA

Vue en projection de la distribution du gaz et des étoiles dans la simulation MareNostrum réalisée sur l'ordinateur MareNostrum du centre de calcul de Barcelone (Espagne).

cosmologique. Ce dernier ne peut plus résister à l'**attraction gravitationnelle**, et les halos de gaz s'effondrent rapidement pour former des structures en équilibre centrifuge : les disques galactiques. Les propriétés microscopiques de l'atome d'hydrogène sont donc à l'origine de la masse des galaxies. La modélisation numérique de ce scénario pose de nombreux problèmes, pour la plupart liés à la résolution limitée des calculs. Pour surmonter l'obstacle, la **collaboration Horizon** a choisi de modéliser un Univers virtuel artificiellement petit (150 millions d'**années-lumière**), afin d'atteindre l'échelle des galaxies. La simulation MareNostrum, réalisée sur l'ordinateur du centre de calcul de Barcelone, n'en reste pas moins d'une ampleur inégalée. Elle a fait apparaître des disques à structure spirale, avec plusieurs milliers de **mailles** par galaxie. Néanmoins de nombreux problèmes demeurent : les galaxies simulées sont trop petites et elles contiennent trop d'étoiles, pour n'en citer que deux.

L'Univers a-t-il une forme ? Est-il fini ou infini ?

Les **modèles cosmologiques** sont construits dans le cadre de la **relativité générale** d'Einstein, théorie qui interprète la **gravitation** comme une manifestation de la courbure de l'espace induite par la distribution de matière et d'énergie. En supposant que l'espace est homogène et **isotrope**, les mesures cosmologiques les plus récentes semblent indiquer une courbure très faible de l'espace. Les astrophysiciens attribuent alors à l'Univers une géométrie euclidienne. Répugnant à imaginer un Univers limité par un bord pour éviter la question gênante « Qu'y a-t-il derrière le bord ? », ils le considèrent comme infini. Pourtant, les mathématiciens ont montré depuis longtemps qu'un espace peut être à la fois fini *et* dépourvu de bords – la surface d'une sphère ou d'un tore en constituent deux exemples. Un être hypothétique évoluant à la surface d'un tore aurait l'illusion de vivre sur une surface infinie, puisque aucun bord ne viendrait limiter ses déplacements. Il en conclurait certainement que son Univers observable est infini, alors que son Univers réel est fini (figure 1). L'application de cette idée aux modèles cosmologiques est riche d'enseignements.

Comment apparaîtrait l'Univers s'il se refermait sur lui-même à la manière d'un tore ? Pour atteindre l'observateur, la lumière émise par une **galaxie** lointaine pourrait emprunter plusieurs trajets : en suivant le chemin le plus direct, mais aussi, parmi une infinité d'autres possibilités, un autre qui ferait le tour de l'Univers – la surface du tore – en prenant la direction « opposée » à la précédente. La même source serait donc vue de multiples fois dans différentes directions et le ciel apparaîtrait peuplé de nombreuses galaxies fantômes, images d'une poignée de galaxies réelles. L'observateur aurait l'illusion de vivre dans un Univers beaucoup plus grand et beaucoup plus rempli qu'il ne l'est en réalité (figure 1).

ESO

Quelle est la forme de l'Univers ? Est-il fini ou infini ? Il semble que les réponses à ces questions millénaires soient enfin accessibles à nos observations et à nos modèles cosmologiques.

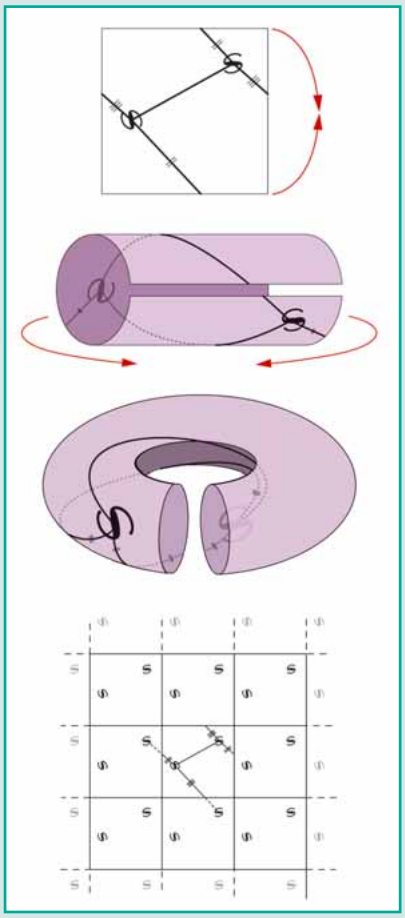


Figure 1.
Principe de construction d'un Univers fini et sans bords à deux dimensions : on identifie les côtés opposés d'un carré. Un observateur qui vit à la surface d'un tel Univers a l'illusion de vivre sur un plan infini.

Ce type de simulation doit en effet aborder un nouveau problème : simuler la formation des étoiles. Les modèles actuels de formation d'étoiles sont fondés eux aussi sur une approche phénoménologique. À chaque fois que les physiciens progressent dans la description mathématique du modèle, un nouvel horizon cognitif apparaît, et la solution leur échappe. La précédente génération de simulations s'attachait à simuler la matière noire, les galaxies représentant la frontière du modèle. La génération actuelle s'attaque à la modélisation des galaxies, avec comme nouvelle frontière la formation des étoiles. En extrapolant la loi de Moore[4], il semble acquis que les dix à vingt prochaines années verront l'avènement de simulations permettant de simuler chaque étoile individuellement, avec vraisemblablement un nouveau verrou cognitif qu'il faudra surmonter.

(4) Loi empirique énoncée en 1965 par l'ingénieur électronicien Gordon Moore, et jamais démentie par les faits jusqu'à aujourd'hui. Elle stipule que la densité de composants sur une puce électronique double tous les deux ans (chiffre ramené ensuite à 18 mois). La puissance des ordinateurs suit. Cette progression exponentielle devrait rencontrer des limites physiques vers 2015.

> Romain Teyssier
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

POUR EN SAVOIR PLUS

A. Dekel, Y. Birnboim, G. Engel, J. Freundlich, T. Goerdt, M. Mumcuoglu, E. Neistein, C. Pichon, R. Teyssier, E. Zinger, « Cold Streams in Early Massive Hot Haloes as the Main Mode of Galaxy Formation », *Nature*, 457, p. 451-454, 2009.

R. Teyssier *et al.*, « Full-Sky Weak-Lensing Simulation with 70 Billion Particles », *Astronomy & Astrophysics*, 497 (2), p. 335-341, 2009.

R. Teyssier, C. Pichon, « L'Univers dans un ordinateur », *Dossier Pour la Science « Galaxies : fenêtres sur l'Univers »*, 56, 2007.

Les enseignements du fond diffus

Des indices sur la forme de l'Univers peuvent être cherchés dans le **fond diffus cosmologique**. Ce rayonnement, émis il y a 13,7 milliards d'années au moment où l'Univers est devenu transparent, semble émis par la surface d'une gigantesque sphère dont la Terre occupe le centre[1]. La température de ce rayonnement est affectée par de minuscules fluctuations, de l'ordre d'un millième de pour-cent. Leur distribution angulaire peut être décomposée en harmoniques sphériques[2] à la manière dont un son est décomposé en harmoniques ordinaires. Les amplitudes de cette décomposition dépendent de la géométrie de l'espace et des conditions physiques qui régnaient à l'époque de l'émission du fond diffus. La forme de l'espace affecte aussi ces amplitudes. Ainsi, elles sont nulles si leur longueur d'onde est plus grande que la « circonférence » de l'Univers. Cette absence des grandes longueurs d'onde a été constatée dans les observations menées par le satellite américain WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) de 2003 à 2006. Partant de ce résultat, un nouveau modèle cosmologique a été proposé, alternative au modèle cosmologique standard euclidien et infini : l'Univers aurait la structure topologique de l'espace dodécaédrique de Poincaré, dont la géométrie est sphérique (figure 2). Par ailleurs, ce modèle prédit la présence de corrélations particulières dans le fond diffus cosmologique – des paires de cercles « homologues » le long desquels les fluctuations de température seraient les mêmes.

Depuis 2003, trois équipes différentes (américaine, allemande et polonaise) se sont penchées sur le test de ce modèle en utilisant divers indicateurs statistiques et des **simulations numériques** massives. Aucune réponse claire n'a émergé car le signal attendu est dégradé par divers effets cosmologiques, par des contaminations d'origine astrophysique et par les imperfections instrumentales. Cependant, l'analyse la plus récente, réalisée à l'aide de méthodes statistiques sophistiquées, semble favoriser la symétrie dodécaédrique dans la carte du ciel produite par le satellite WMAP. De nouvelles observations sont évidemment nécessaires pour valider ou non le modèle. Pour faire avancer le débat, les données du satellite européen Planck, lancé en mai 2009, (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90) sont attendues avec impatience.

Désormais, le problème de la forme de l'Univers[3] a quitté le domaine de la spéculation métaphysique. Les prochaines années seront riches d'observations cosmologiques fines et devraient apporter de nouveaux changements dans nos représentations de l'Univers. Sans doute permettront-elles de trancher la question de sa forme...

(1) La Terre ou, plus précisément, le lieu de l'observation. Il y a en effet de bonnes raisons de penser que l'image apparaîtrait identique quel que soit ce lieu. La Terre n'est pas un point particulier de l'Univers.

(2) Harmonique sphérique : fonction sphérique utilisée en mathématiques dès qu'intervient la notion d'orientation (**anisotropie**) et donc de rotation. Elle est caractérisée par un laplacien (opérateur différentiel) nul.

(3) Pour en savoir plus : *L'Univers a-t-il une forme ?* Roland Lehoucq, Flammarion, collection Champs.

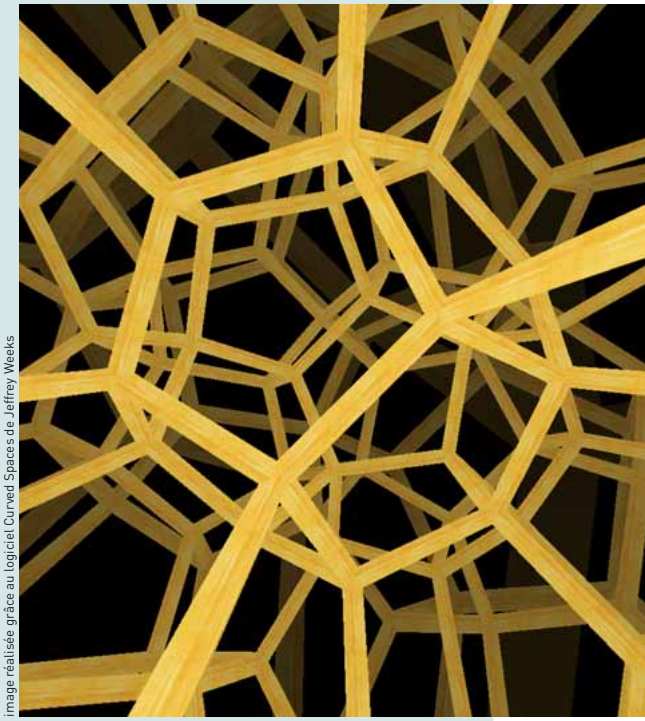


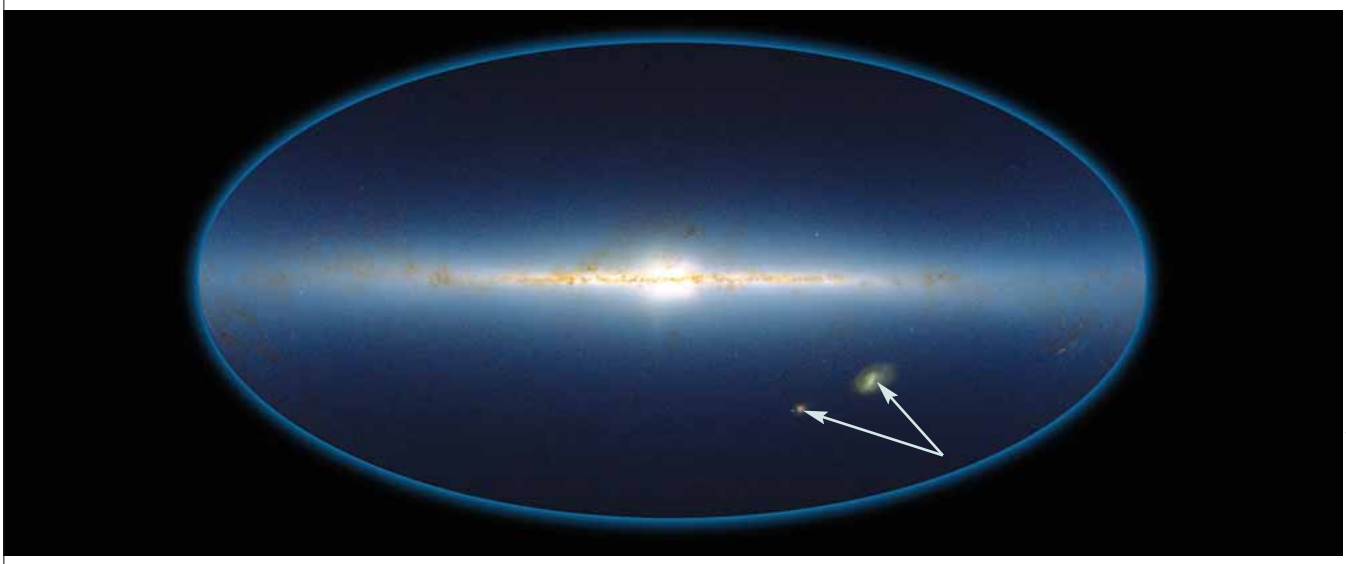
image réalisée grâce au logiciel Curved Spaces de Jeffrey Weeks

Figure 2.
L'espace dodécaédrique de Poincaré est un espace sphérique fini et sans bords construit en identifiant les faces opposées d'un dodécaèdre régulier après une rotation d'un dixième de tour. Ce modèle rend bien compte des fluctuations de température du fond diffus cosmologique à grande échelle angulaire.

> Roland Lehoucq
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles
(CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Odyssée dans **la part sombre de l'Univers**

La cosmologie serait-elle entrée dans une des phases les plus passionnantes de son histoire ? Les astrophysiciens et physiciens des particules le pensent, vu la moisson de données transmise par les télescopes qu'ils ont posés à terre, voire sous terre, et même dans des satellites, pour tenter d'élucider les mystères de la structuration de l'Univers. De l'analyse de ces données, ils attendent un éclaircissement sur les différentes versions du plus célèbre modèle cosmologique : le big bang. Mais ils espèrent aussi que ces données leur permettront bientôt de lever une partie du voile sur le double mystère de la matière et de l'énergie noires.



Institut de Californie/NASA

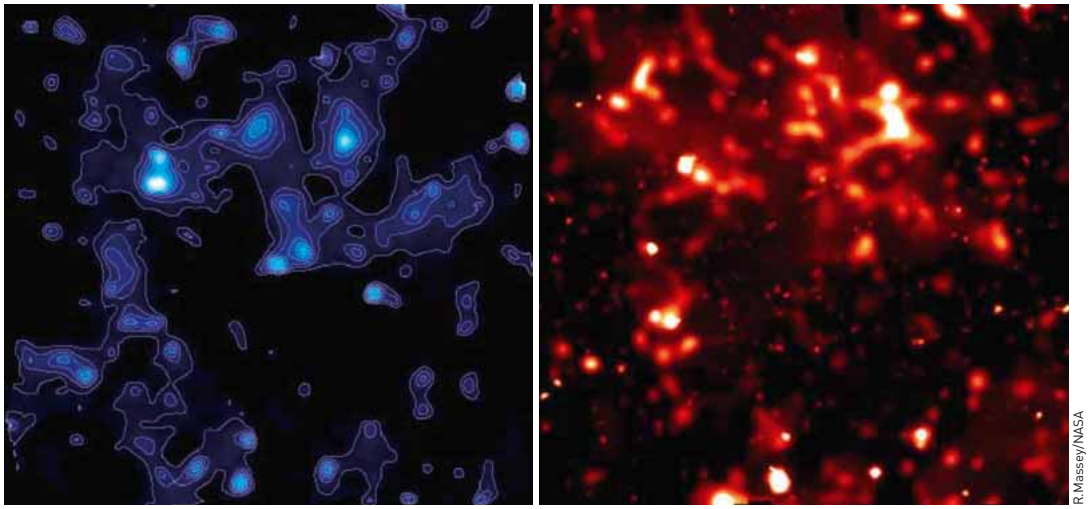
La Voie lactée dans le domaine infrarouge avec les Nuages de Magellan, deux galaxies satellites de la nôtre visibles à droite de l'image. Image mosaïque obtenue par le *Two Micron All Sky Survey*, programme conjoint de l'Université du Massachussetts, de l'Institut de technologie de Californie et financé par la NASA.

1. L'énigmatique matière noire

Astrophysique et observation de la matière noire

Regroupant des dizaines de milliards d'étoiles, les galaxies peuvent elles-mêmes s'assembler par dizaines ou centaines et former aussi des amas. Les mouvements qui les animent intriguent depuis longtemps les astrophysiciens, d'autant que des études récentes concluent qu'une partie de la masse de l'Univers échapperait aux observations des chercheurs. L'atome ne serait-il alors que l'écume de la matière ?

Il arrive qu'un astre se découvre par le seul calcul. Ainsi, en 1844, l'astronome Friedrich Bessel[1] attribue les anomalies du mouvement propre apparent de l'étoile Sirius à la présence d'un « compagnon » invisible. Dix-huit ans plus tard, la confirmation de ce calcul arrive par la découverte d'une **naine blanche** faisant de Sirius une **étoile** binaire. Dans la foulée, en 1846, Urbain Le Verrier[2] et John-Couch Adams[3] envisagent qu'une planète inconnue soit à l'origine des mouvements d'Uranus, là encore qualifiés « d'anormaux ». Suivant les indications d'Urbain Le Verrier, l'astronome Johann Galle[4] observe ensuite la **planète** Neptune à moins d'un degré de la position calculée à partir des écarts que manifeste Uranus par rapport aux **lois de Newton**. En 1932, Jan Oort[5] étudie la distribution des vitesses d'étoiles situées dans



R.Massey/NASA

Carte de la matière noire (en bleu, à gauche) et de la matière visible (en rouge, à droite) d'une même région de l'Univers. Les concentrations les plus denses de matière se retrouvent identiques sur les deux images, démontrant que la matière visible se concentre dans les régions où la matière noire domine.

le voisinage du **Soleil** pour déterminer le champ gravitationnel local. Il suggère que ces étoiles ne contribuent que pour moitié à la quantité de matière nécessaire pour expliquer leurs mouvements. Parallèlement, l'Américain Fritz Zwicky[6] étudie la distribution des vitesses des **galaxies** dans le grand amas de la constellation boréale nommée Coma Berenices. Et, en 1933, il peut également avancer que les galaxies de l'**amas** ne représentent que 10 % de la masse nécessaire pour expliquer les vitesses mesurées. L'essentiel de la masse de l'amas serait donc une forme non lumineuse. Malgré son importance, cette découverte ne trouvera guère de retentissement et plus de quarante ans s'écoulent avant qu'une accumulation de données, conduisant toutes à ce même constat, ne la fasse revenir au premier plan. Aujourd'hui, près de quatre-vingts ans après l'observation de Fritz Zwicky, ses conclusions se confirment : une fraction importante de la masse de l'Univers ne serait effectivement pas lumineuse !

La **matière noire** soulève donc une série d'interrogations – en relation ou pas entre elles – qui se posent aussi bien à l'échelle des galaxies, que des amas de galaxies ou de l'Univers tout entier.

La matière noire dans les galaxies

La vitesse de rotation d'une galaxie spirale se mesure par le **décalage Doppler**, soit de la lumière des étoiles formant le disque de cette galaxie, soit de nuages d'**hydrogène** neutre localisés au-delà de son bord lumineux. La courbe obtenue, représentant la vitesse de rotation du disque en fonction de la distance au centre de la galaxie, permet de déterminer la distribution de masse de la galaxie, tout comme une planète en orbite autour du Soleil permet de déduire la masse du Soleil si la distance qui le sépare de la planète est connue. Mais il se trouve que la comparaison entre cette distribution de masse déterminée par l'influence gravitationnelle

(1) Friedrich Bessel (1784-1846), astronome et mathématicien allemand, fondateur de l'école allemande d'astronomie d'observation.

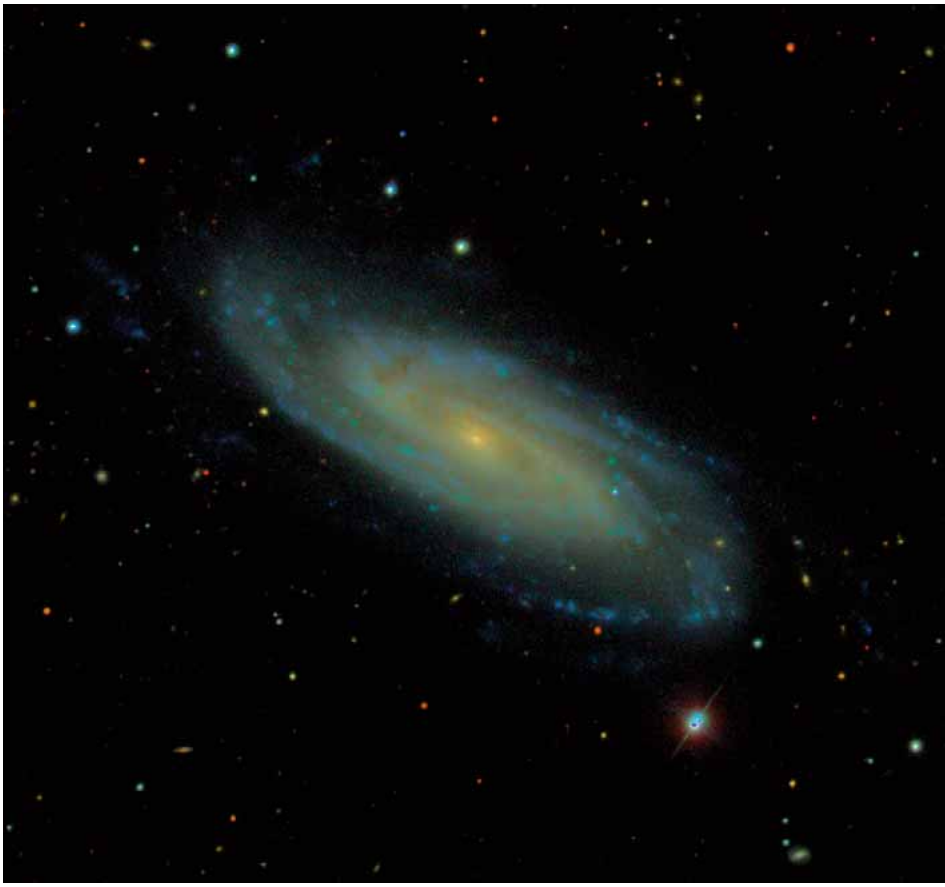
(2) Urbain Le Verrier (1811-1877), astronome et mathématicien français spécialiste en mécanique céleste.

(3) John-Couch Adams (1819-1892), astronome et mathématicien britannique ayant prédit l'existence et la position de la planète Neptune, en ne se basant que sur les mathématiques.

(4) Johann Galle (1812-1910), astronome allemand de l'observatoire de Berlin.

(5) Jan Oort (1900-1992), astronome néerlandais, directeur de l'observatoire de Leyde de 1945 à 1970, qui mena de nombreuses recherches sur notre Galaxie.

(6) Fritz Zwicky (1898-1974), astrophysicien américano-suisse, connu comme le plus grand découvreur de supernovae.



ESA

Image de la galaxie spirale NGC 3198 dont la courbe de rotation indique que les étoiles qui la composent ne contribuent que faiblement à sa masse. Il semblerait que, comme beaucoup d'autres, cette galaxie soit entourée d'un halo massif de matière sombre.

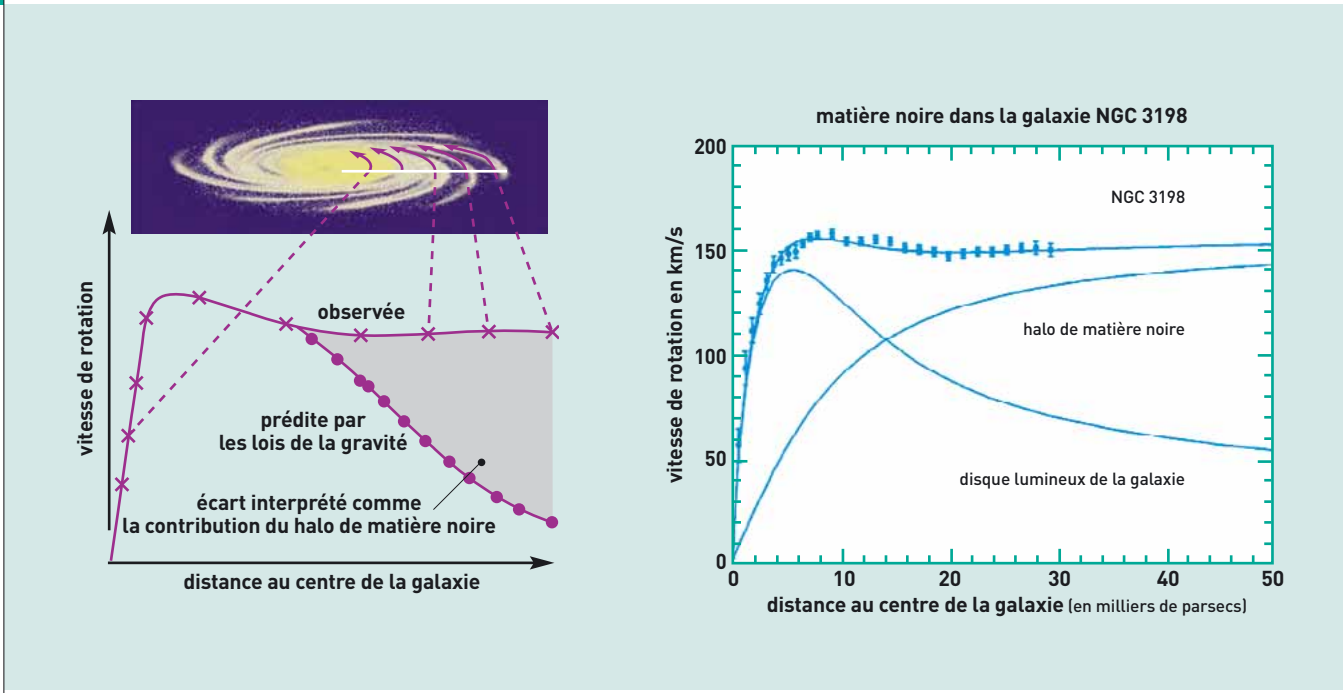


Figure 1.
La vitesse de rotation des galaxies spirales suggère qu'elles contiennent une importante quantité de matière sombre. En effet, contrairement à la décroissance prédite d'après la baisse de luminosité du disque d'étoile, au fur et à mesure de l'éloignement du centre de la galaxie, la vitesse de rotation mesurée demeure constante.

de la galaxie et celle estimée à partir de la **luminosité** des étoiles, laisse apparaître un net désaccord. En effet, la luminosité du disque stellaire décroissant exponentiellement en fonction de la distance avec le centre de la galaxie, tout laisse à penser que la masse de la galaxie se concentre essentiellement dans son centre ; pourtant, la vitesse de rotation demeurant constante, aussi loin qu'on pousse la mesure, ce résultat démontre qu'au contraire, une importante quantité de matière se trouverait dans les régions de luminosité faible ou nulle (figure 1).
Des études systématiques, portant sur des milliers de galaxies, attestent à la fois le caractère universel de ce phénomène et la présence d'un excédent de matière noire dans presque toutes les galaxies spirales. Cette anomalie s'explique par la présence d'un **halo** massif, grossièrement sphérique, s'étendant de dix à vingt fois plus loin que le disque d'étoiles. Pour l'hypothèse la plus courante, ce halo sombre se compose d'astres compacts très faiblement lumineux : planètes, étoiles en fin de vie ayant brûlé tout leur combustible (naines blanches) ou **trous noirs**. Restait à vérifier cette hypothèse, d'où l'expérience EROS (pour Expérience de recherche d'objets sombres), conduite par l'Irfu, qui a mesuré, nuit après nuit, la lumière des étoiles de deux galaxies satellites de la **Voie lactée** : les Nuages de Magellan. Il s'agissait de chercher une amplification lumineuse temporaire causée par la gravitation d'un astre sombre du halo, lors de son passage sur la ligne de visée d'une des étoiles observées. Dix années de « traque » permettront d'exclure l'hypothèse que le halo sombre de notre Voie lactée soit majoritairement constitué d'astres non lumineux. Et donc, la nature de cette matière sombre garde tout son mystère.

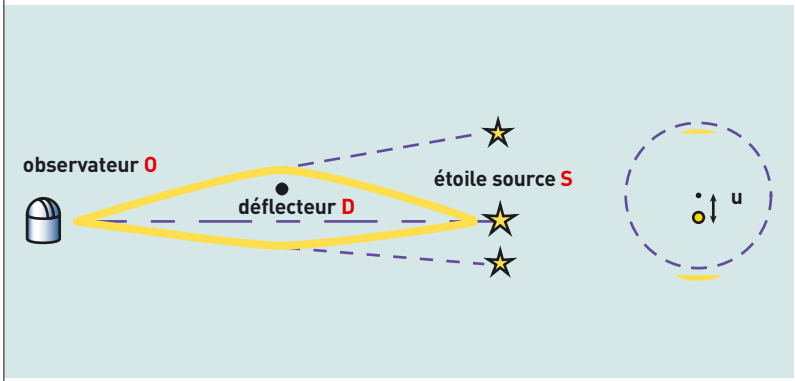
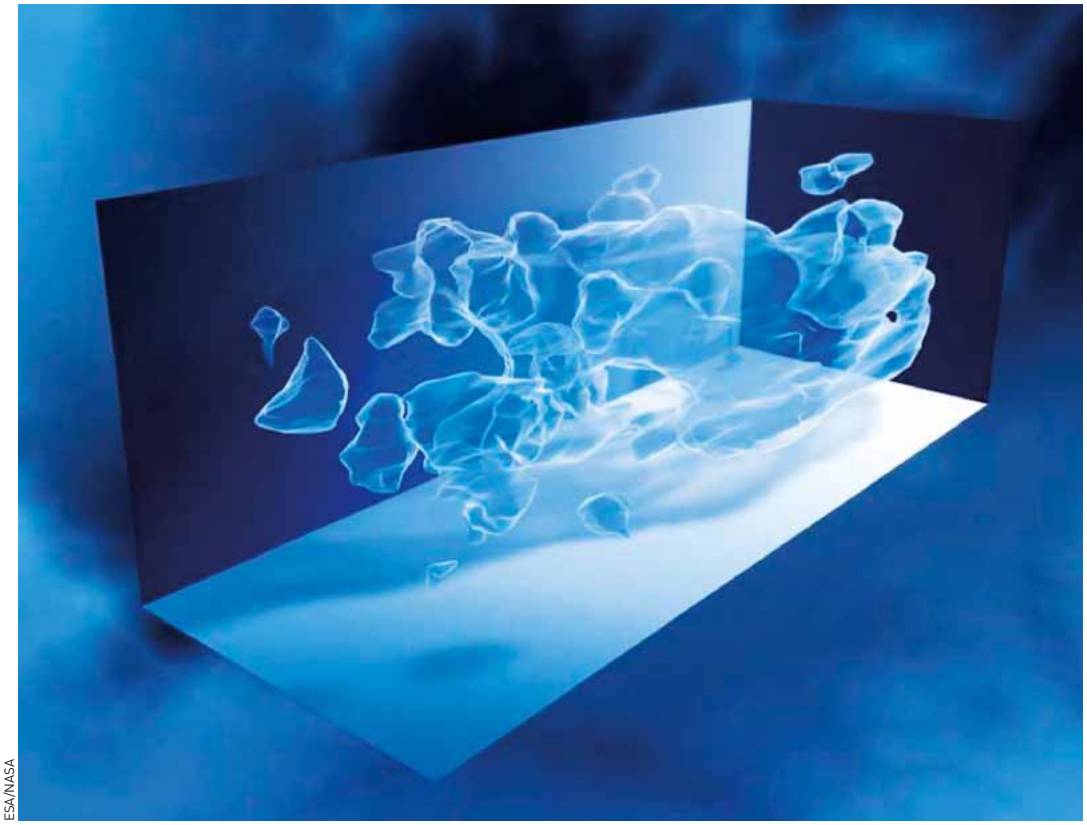


Figure 2.
Schéma décrivant le principe du mirage gravitationnel.
À gauche : l'astre sombre central déforme l'espace-temps modifiant le trajet des rayons lumineux qui passent dans son voisinage.
À droite : les deux trajets lumineux possibles donnent chacun une image déformée de l'étoile ou de la galaxie située derrière l'astre responsable du mirage gravitationnel (« u », le paramètre d'impact, représente la distance entre l'objet massif et la ligne de visée vers l'étoile ; l'effet de mirage gravitationnel est d'autant plus prononcé que « u » s'avère petit).

La matière noire dans les amas de galaxies

Les premiers soupçons sur la présence de matière noire dans les amas de galaxies remontent à Fritz Zwicky. En 1933, il avança que l'amas nommé Coma Berenices contient nettement plus de matière sombre que de matière lumineuse. Son analyse s'appuyait sur un résultat de mécanique classique, dit *théorème du viriel*, selon lequel, dans un système en équilibre dynamique, la somme de l'énergie potentielle et du double de l'énergie cinétique, est égale à zéro. D'où l'estimation immédiate de la masse de l'amas de galaxies, en fonction de sa taille et de la vitesse des galaxies le composant. Cette méthode laisse néanmoins planer quelques incertitudes découlant de la difficulté de dénombrer les galaxies composant les



ESA/NASA

Carte tridimensionnelle de la matière noire déduite de la distribution des arclets dans la portion d'Univers observée.

amas, sans y intégrer des galaxies extérieures, tout en comptant des galaxies de très faible luminosité. En outre, l'amas ne se trouve pas toujours en équilibre dynamique (condition d'application du théorème du viriel) car le temps de sa mise en équilibre peut dépasser les dix milliards d'années. Enfin, la situation n'offre qu'une vue partielle car toutes les distances apparaissent en projection et n'autorisent que la mesure des seules vitesses radiales.

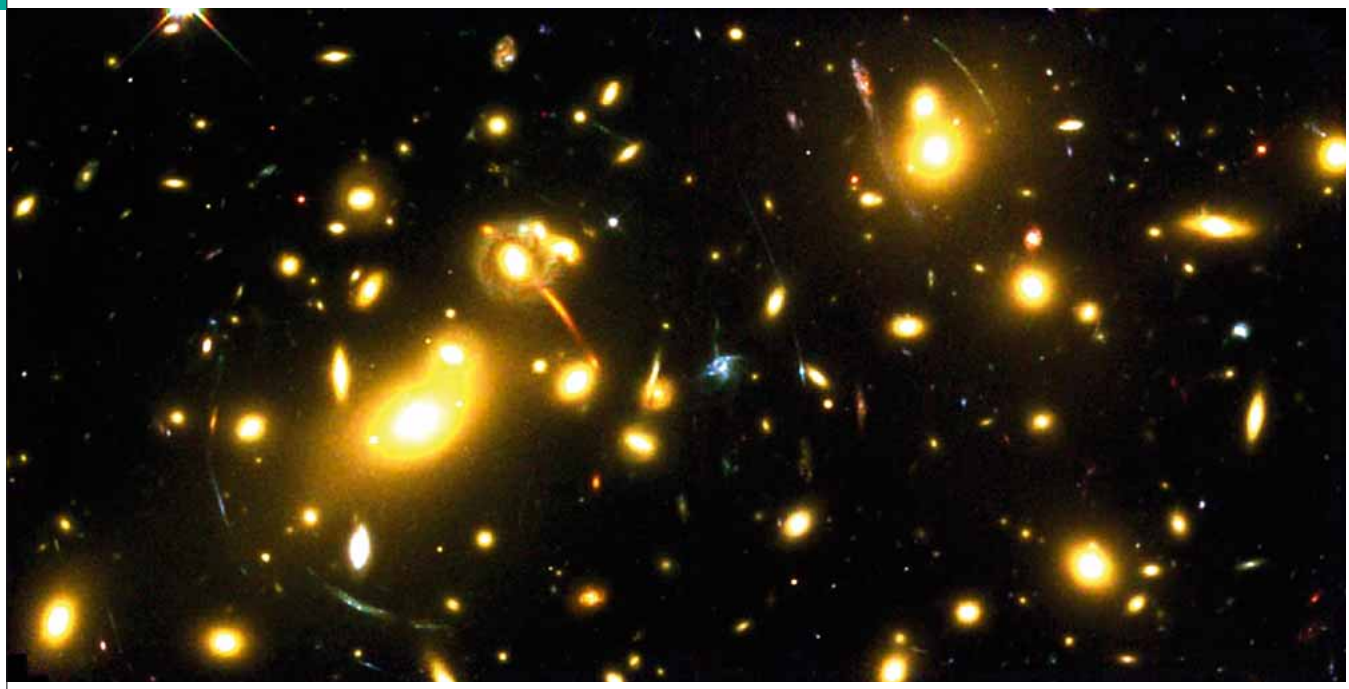
Pourtant, les résultats obtenus par l'analyse du rayonnement X, émis par le gaz chaud diffus localisé entre les galaxies des amas, vont confirmer cette hypothèse. Les mesures réalisées par des satellites comme Röntgensatellit (ROSAT), lancé par l'Allemagne en 1990, XMM-Newton, de l'**Agence spatiale européenne** (**ESA**), ou encore Chandra, de la **NASA**, lancés tous deux en 1999, sont unanimes : le gaz qui baigne les galaxies semble en équilibre dans le champ de gravité de l'amas, lequel est engendré par les galaxies, le gaz chaud et la matière noire. De plus, l'intensité de l'émission X du gaz permet de calculer non seulement la masse de gaz mais aussi le potentiel gravitationnel dans lequel il se trouve plongé et donc, la masse totale de l'amas. Pour un amas typique, les étoiles représenteraient donc 2 à 4 % de la masse totale et le gaz chaud 12 à 16 % seulement. Même en tenant compte de la matière sombre déduite de l'étude de leurs courbes de rotation, les galaxies apparaissent donc comme négligeables dans le bilan de la masse des amas.

En 1986, une autre méthode fondée sur l'étude de *mirages gravitationnels* présents autour des amas de galaxies a confirmé ces résultats (figure 2). Parmi les observations les plus spectaculaires figurent celles d'**arcs lumineux** montrant des décalages spectraux nettement supérieurs à celui de l'amas. Les astrophysiciens y voient des images de galaxies situées derrière l'amas et déformées par le champ gravitationnel de celui-ci. Il s'agit de mirages gravitationnels, ce que la **théorie de la relativité générale** d'Albert Einstein permet de comprendre. En effet, si la gravitation résulte de la déformation imposée par la matière et l'énergie à l'**espace-temps**, alors la lumière elle-même devient sensible à la gravité puisqu'elle suit les lignes du plus court chemin de l'espace-temps courbé par la matière. Outre ces arcs lumineux, les observations révéleront également un phénomène encore plus fréquent, celui des « arclets », petites images de galaxies d'arrière-plan, légèrement tordues par le champ de l'amas. La répartition, l'orientation et l'intensité de ces distorsions permettent de reconstituer, avec une remarquable précision, la distribution de masse de l'amas responsable. Une équipe internationale de scientifiques, comprenant des chercheurs de l'Irfu, a ainsi réalisé la première carte tridimensionnelle de la distribution de matière noire dans une portion d'Univers.

Ces études, indépendantes les unes des autres, convergent en faveur de masses élevées pour les amas de galaxies. Elles confirment donc les résultats obtenus par les distributions de vitesses et l'émission X.

La matière noire à l'échelle de l'Univers

L'étude du **rayonnement** à 2,7 K qui baigne aujourd'hui l'ensemble de l'Univers permet également de déterminer la composition de l'Univers dans son ensemble. D'où vient ce rayonnement ? Notre Univers étant en expansion, il a dû passer par une phase plus dense et plus chaude que celle qui

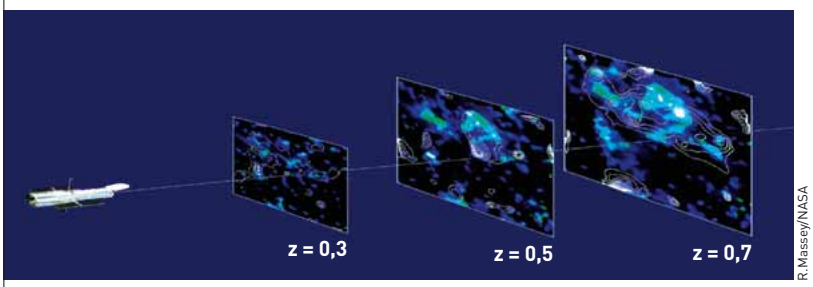


NASA

Les arcs lumineux autour de l'amas de galaxie Abell 2218 sont des images déformées de galaxies situées derrière l'amas photographié. Le champ gravitationnel de l'amas agit comme une lentille déformant les objets en arrière-plan.

prévaut actuellement. Après 380 000 ans d'expansion, l'Univers s'est suffisamment refroidi pour que les électrons et les protons s'assemblent pour former des atomes d'hydrogène neutre. Toutes les conditions se trouvaient ainsi réunies pour que la lumière se propage librement sans trop interagir avec la matière. Cette lumière fossile a véhiculé, jusqu'à nos jours, des informations précieuses sur les conditions régnant alors dans l'Univers. Or, dans cette image à 2,7 K, d'infimes inhomogénéités, de température apparaissent, traduisant l'existence d'autres inhomogénéités, notamment de densité de matière. Pour les astrophysiciens, il s'agit de galaxies et d'amas de galaxie en germes. Dans le **Modèle standard** de la **cosmologie**, l'étude statistique de ces inhomogénéités a permis d'estimer la densité de matière et d'énergie présente dans l'Univers avec une surprise à la clef : non seulement la densité de matière dépasse d'un facteur dix la densité de matière lumineuse (étoiles, gaz …) mais la densité totale d'énergie dans l'Univers surpasse aussi celle de la matière (voir *Astrophysique et observation de l'énergie noire, p. 81*). Ceci induit la présence d'une composante d'énergie non détectée jusqu'alors.

Néanmoins, cette étude recèle encore des incertitudes. Aussi a-t-il fallu tester la validité des résultats annoncés par des études indépendantes. Des mesures récentes, portant sur la distribution spatiale des galaxies semblent privilégier une séparation inter-galaxies de 150 millions de **parsecs**, correspondant à une prédiction des modèles de matière noire froide (voir *Théorie de la matière noire, p. 77*). L'explication vient du fait que de petites fluctuations opérant dans l'Univers primordial – contenant à la fois des **photons**, des électrons et de la matière noire – évoluent à la manière d'une **onde** sphérique sous l'effet de la pression des photons et cela, jusqu'à la formation des premiers atomes d'hydrogène. Les photons s'échappent alors du mélange et l'onde demeure figée à la distance qu'elle a parcourue pendant 380 000 ans (l'âge de l'Univers lors du gel de l'onde). Aujourd'hui, cela correspond à une taille de 150 millions de parsecs. Les galaxies se construisent dans les régions plus denses, de sorte qu'elles se retrouvent essentiellement à la position de la fluctuation initiale ou du bourrelet de matière distant de 150 millions de parsecs. La mesure de cette distance confirme la densité de matière dans l'Univers, corroborant les résultats apportés par les études sur le rayonnement à 2,7 K, ainsi que l'existence d'une grande quantité de matière noire à l'échelle de l'Univers.



R. Massey/NASA

Cartographie de la matière noire selon la distance dans trois tranches d'Univers correspondant à un âge de 7 (z = 0,7), 9 (z = 0,5) et 10 (z = 0,3) milliards d'années, et montrant la concentration progressive de matière noire au cours de l'évolution cosmique. z désigne le *redshift*, ou décalage vers le rouge. Plus z est grand, plus la distance spatio-temporelle de l'objet est grande.

> Nathalie Palanque-Delabrouille
Service de physique des particules
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay (Gif-sur-Yvette)

> Roland Lehoucq
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Théorie de la matière noire

Même si l'existence de la matière noire fut envisagée dès 1930 et donc il y a déjà 80 ans, même si les astrophysiciens ne doutent plus de son existence, même si elle s'avère cinq fois plus abondante dans l'Univers que la matière ordinaire... sa vraie nature demeure une énigme dont la résolution suscite nombre d'études aussi bien théoriques qu'expérimentales, chacune avec une proposition à la clef. En l'état des connaissances, il s'agirait d'une matière invisible, remplissant les galaxies, courbant les rayons lumineux à leur passage à travers les amas galactiques et jouant un rôle crucial dans la formation de grandes structures de l'Univers dont elle assurerait la cohésion. De quoi s'agit-il ?

Cinquante années d'études en **cosmologie** et en physique des particules ont amené les chercheurs à proposer des dizaines de particules « exotiques » portant des noms aussi curieux que « **neutralinos** » ou « particules de Kaluza-Klein ». Ces particules tirent leur origine dans des constructions théoriques comme la supersymétrie ou les **dimensions supplémentaires**, voire de propositions plus exotiques encore. Reparcourons les étapes ayant permis aux scientifiques de se convaincre de l'existence de la **matière noire** et aux théoriciens d'exercer leur imagination pour chercher la bonne solution de l'énigme.

Et si la matière noire n'existait pas ?

Les observations montrent que les **étoiles** périphériques de certaines **galaxies spirales** en rotation rapide subissent une **attraction gravitationnelle** beaucoup plus forte que celle qui s'obtiendrait en appliquant la **loi de Newton** à la matière visible dans les régions centrales de ces **galaxies**. Une question surgit alors : et si, au lieu de postuler l'existence de la matière invisible, on modifiait plutôt cette loi de manière à rendre l'accélération gravitationnelle plus forte à une grande distance du centre galactique ? Avancée, dans les années 1980, par Mordehai Milgrom[1] avec sa théorie MOND (*Modified Newtonian Dynamics*), cette proposition, aussi pragmatique soit-elle, soulève néanmoins un certain nombre de difficultés, notamment à l'échelle des **amas de galaxies**, et plus généralement encore à l'échelle cosmologique. Ces difficultés viennent du fait que le **spectre du CMB** (*Cosmic Microwave Background*), dit aussi **fond diffus cosmologique**, ainsi que la formation gravitationnelle des grandes structures, indiquent que l'Univers requiert vraiment plus de matière que celle observée. En conséquence, la communauté scientifique considère aujourd'hui comme improbable que MOND puisse résoudre le problème de la matière noire.

Et si la matière noire n'était que de la matière ordinaire « déguisée » ?

La nécessité d'invoquer la présence d'une masse invisible amène les chercheurs à s'orienter, en premier, vers les constituants connus, mais élusifs, de la matière ordinaire : des **trous noirs**, du gaz interstellaire raréfié constitué de **protons** ou encore un grand nombre de neutrinos, reliques du **Big bang**.

(1) Mordehai Milgrom, physicien et professeur israélien de l'Institut Weizmann.

NASA/Goddard Space Flight Center/General Dynamics

Vue d'artiste du satellite Fermi, en orbite depuis juin 2008, cherchant notamment à détecter les rayons gamma de haute énergie (des centaines de gigaélectronvolts) provenant de l'annihilation de la matière noire.

Encore une fois, les observations cosmologiques excluent ces possibilités. S'il existait beaucoup de trous noirs dans les galaxies, on en verrait leurs effets sous la forme de lentilles gravitationnelles, quand ils passent devant les sources lumineuses. S'il y avait beaucoup de protons en forme de gaz, ils émettraient un grand nombre de rayons X et formeraient plus d'**hélium** qu'on en observe. Enfin, la contrainte que l'on a sur la masse des neutrinos (inférieure à quelques **électronvolts**) montre qu'ils sont trop légers pour accomplir le rôle de la masse manquante. De plus, de par leur masse si faible, les neutrinos se déplacent à grande vitesse dans l'Univers, ce qui les empêche d'engendrer de grandes structures comme les galaxies qui ne peuvent se former qu'à partir de matière lourde capable de « condenser » gravitationnellement dans des puits de potentiel.

Il faut donc bien une particule nouvelle : quelles en sont les propriétés générales ?

Heureusement, bien qu'encore inconnue, cette particule nous livre des indices quant à ses propriétés. Premièrement, la matière noire doit avoir des interactions faibles ou très faibles, voir même nulles, avec le reste de la matière : elle est donc très difficile à détecter. En particulier, elle ne possède

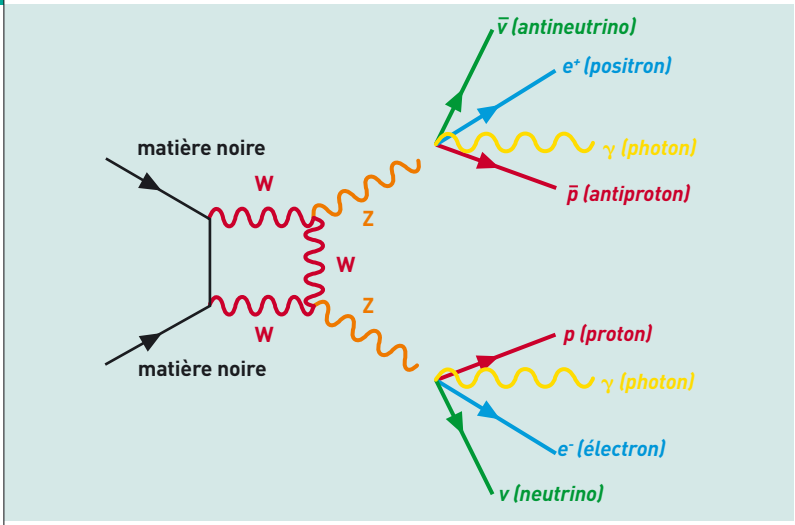


Figure 1.
Diagramme de Feynman (d'après le physicien Richard Feynman, prix Nobel en 1965) illustrant l'annihilation de la matière noire en produits finaux ordinaires. Les physiciens utilisent ce type de diagramme pour calculer les propriétés du flux attendu : chaque diagramme décrit, de façon mathématique précise, les caractéristiques des particules et de leurs interactions. Dans ce cas, deux particules de matière noire s'approchent et s'annihilent en deux bosons faibles Z. L'annihilation se produit par la création et l'immédiate destruction d'une boucle compliquée de bosons W. Ensuite, les bosons Z se désintègrent en particules de matière ordinaire, tels que des photons, des neutrinos, des positrons, des antiprotons, etc. Ces produits finaux sont activement recherchés par plusieurs expériences sur Terre et sur des satellites en orbite.

pas de charge électrique et donc elle n'interagit pas avec la lumière (d'où son nom de matière « noire »). Deuxièmement, les données cosmologiques nous apprennent qu'elle doit être « froide » (c'est-à-dire se déplaçant à une vitesse beaucoup plus faible que celle de la lumière) – le cas d'une particule assez lourde ou produite au repos. Enfin, comme elle a probablement été produite aux premiers instants de l'Univers, elle doit être stable ou avoir une très longue durée de vie moyenne, supérieure à l'âge de l'Univers actuel. Dans le cas contraire, elle se serait désintégrée en particules ordinaires dans le passé.
Les faibles interactions de la matière noire avec le reste de la matière pourraient bien être les interactions faibles du **Modèle standard**, par exemple celles responsables de la désintégration radioactive bêta. Les théoriciens considèrent comme très probable cette hypothèse. En effet, les calculs montrent que l'abondance actuelle d'une particule produite lors du big bang avec des propriétés typiques des interactions faibles serait précisément celle de la masse manquante. On appelle **WIMPs** (pour *Weakly Interacting Massive Particles*) de telles particules.

Quelques candidats répondant au profil souhaité
De nombreuses particules ayant ces propriétés, et donc candidates au rôle de matière noire, ont été proposées dans le cadre de théories nouvelles de la physique des particules. Parmi les plus étudiées figure le neutralino en supersymétrie. Introduite en physique des particules dans les années 1980, cette théorie très élégante propose que, pour chaque particule ordinaire, il y ait une particule partenaire supersymétrique dotée des mêmes propriétés (par exemple, de la même charge électrique) mais d'une masse beaucoup plus élevée, estimée à une centaine de gigaélectronvolts environ. Le neutralino figure au nombre de ces particules, ou, plus précisément, un mélange de partenaires supersymétriques du **photon**, du **boson Z** et du **boson de Higgs**. De plus, le neutralino serait doué d'une propriété additionnelle (nommée **R-parité**, une sorte de nouvelle charge) qui, du fait des lois de la nature, ne peut disparaître dans aucun processus physique. En conséquence, il n'est pas possible au neutralino de se désintégrer en particules ordinaires : il serait ainsi stable. Voici pourquoi le neutralino figure comme un bon candidat pour jouer le rôle de matière noire, faisant aussi partie de la catégorie des WIMPs. L'abondance des paramètres théoriques rend ensuite plus riche et plus complexe la phénoménologie de la matière noire supersymétrique. La masse, la composition et les interactions précises des différents composants ont été étudiées en détail pour plusieurs modèles.
Vers la fin des années 1990, des scénarios à **dimensions spatiales supplémentaires** (dites de Kaluza-Klein[(2)], en hommage aux deux théoriciens visionnaires qui les avaient conçus au début du XXe siècle), sont revenus à l'attention des chercheurs. Leur hypothèse est qu'il existerait une cinquième dimension venant s'ajouter aux trois dimensions spatiales et au temps. Sa formation en boucles extrêmement petites la rendrait inaccessible à l'observation directe. Une particule plongée dans cet espace

Pamela collaboration

Le satellite italo-russe PAMELA *(pour Payload for Antimatter Exploration and Light-nuclei Astrophysics)* peu avant le lancement dans une fusée, en 2006. Les données envoyées par le satellite ont révélé l'existence de rayons cosmiques anormaux qui ont bouleversé la communauté des scientifiques travaillant sur la matière noire. Sont-ils dus à l'annihilation de particules de matière noire dans le halo de la galaxie ?

(2)Theodor Franz Eduard Kaluza (1885-1954), physicien et mathématicien allemand, le premier qui imagina une théorie avec des dimensions supplémentaires pour l'Univers. Oskar Klein (1894-1977), physicien théoricien suédois, ayant inventé l'idée que les dimensions supplémentaires peuvent exister physiquement mais sont enroulées et très petites.

4+1 dimensionnel ressemble à une véritable tour de particules semblables dont les masses croissent par paliers d'environ 1 **téraélectronvolt**. Dans l'hypothèse où la « marche zéro » de cette tour se composerait de matière ordinaire (soit une projection quadridimensionnelle de la réalité 5-dimensionnelle) alors, la première marche en serait une copie lourde. Or, si un mécanisme additionnel, dit **parité de Kaluza-Klein**, impose la stabilité des particules de la première marche de la même façon que la **R-parité** en supersymétrie, alors ces particules lourdes constituent des parfaits candidats pour la matière noire – ce qui fut proposé notamment par Géraldine Servant, de l'Institut de physique théorique du CEA, en 1999.
La matière noire supersymétrique et de Kaluza-Klein ont stimulé la plupart des études théoriques et des recherches expérimentales depuis les années 1980. Néanmoins, les chercheurs ayant gardé leur esprit ouvert, de nombreuses autres propositions furent avancées. Par exemple, dans la catégorie de matière noire WIMP, des modèles dits « de matière noire minimale » proposent d'ajouter au modèle standard, non pas un secteur entier de copies, mais seulement les particules strictement nécessaires pour jouer le rôle de la matière noire. Autres hypothèses : celle des « neutrinos stériles », particules similaires aux neutrinos normaux mais plus lourds et sans interaction avec la matière ordinaire ; ou encore celle des *axions*, particules légères produites, peut-être, pendant les premiers instants d'évolution bouillante de l'Univers.

Avec plusieurs candidats pour un seul poste, comment identifier le bon ?
Ce grand nombre de « candidats » traduit le fort intérêt des scientifiques pour l'ensemble de ces questions. Mais il reflète également un manque évident de données expérimentales directes. Heureusement, les prochaines années paraissent prometteuses. Une combinaison de différentes techniques expérimentales sera sans doute nécessaire pour distinguer les différentes théories et parvenir à identifier la nature de la matière noire. Un grand espoir repose sur la production de matière noire par le L*arge Hadron Collider (LHC)*, l'accélérateur de particules du **Cern**, l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (voir *l'encadré, p. 80*). Une autre perspective concerne la détection des produits finaux de l'annihilation de deux particules de matière noire dans le halo galactique (figure 1). Un troisième axe compte sur les expériences souterraines sensibles comme Edelweiss (voir *l'encadré p. 80*) dont le CEA est un acteur majeur, visant à détecter un phénomène particulièrement rare : la collision d'une particule de matière noire de passage. Cette activité expérimentale gigantesque et pluridirectionnelle, indispensable pour tester les différentes prédictions, s'accompagne d'une intense activité théorique.
Ainsi, l'observatoire en orbite PAMELA (pour *Payload for AntiMatter Exploration and Light-nuclei Astrophysics*), lancé par une fusée russe, en 2006, a-t-il récemment décelé des **rayons cosmiques** « anormaux », peut-être produits par les annihilations de la matière noire galactique. Ces données, difficilement explicables en termes de matière noire supersymétrique ou par la théorie de Kaluza-Klein, suscitent déjà la construction de nombreux nouveaux modèles.
Le problème de la matière noire établit des liens étroits entre la physique des particules, la cosmologie et l'astrophysique. Il est probable que, désormais, ce problème à l'échelle galactique et cosmologique se résoudra avec un nouvel état des plus petits constituants de la matière. L'exploration de la physique à l'échelle du téraélectronvolt au LHC, les observations astronomiques en rayons gamma du satellite Fermi ainsi que la prochaine génération de détecteurs souterrains issus de l'expérience Edelweiss, laissent augurer que la matière noire dévoilera bientôt son secret.

P. Stoppa/CEA

La recherche fondamentale en physique des particules a fait d'énormes progrès pour valider un cadre théorique appelé Modèle standard. De nouvelles particules, comme le boson de Higgs et de nouveaux processus sont attendus dans le cadre des expériences du LHC visant à élargir ce modèle. Une de ces nouvelles particules sera-t-elle la matière noire ?

> **Marco Cirelli**
et **Camille Bonvin**
Institut de physique théorique
(Unité de recherche associée au CNRS)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay

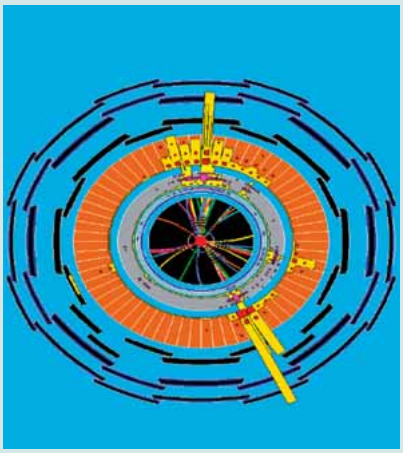
Pourra-t-on créer un jour de la matière noire au LHC ?

Pour répondre aux questions les plus fondamentales de la physique, le **Cern** (Organisation européenne pour la recherche nucléaire) a mis en service, en 2008, le grand collisionneur de hadrons (LHC). En tant que pays hôte, la France a participé à sa construction par l'intermédiaire de ses deux plus importants organismes de recherche : le **CNRS** et le CEA. Au sein de ce grand instrument, les physiciens travaillent à provoquer des collisions entre faisceaux de protons de 7 **TeV** (soit 7 000 **GeV**) d'énergie, observées par deux grandes expériences généralistes :

- ATLAS (pour *A Toroidal LHC Apparatus*) : il s'agit d'un des deux plus grands et plus complexes détecteurs construits à ce jour. Cette expérience de physique auprès du LHC est menée par une collaboration mondiale de scientifiques (1 800 physiciens et ingénieurs issus de 150 laboratoires de 34 pays différents) pour trouver le **boson de Higgs**, s'il existe (figure 1), ou d'autres nouvelles particules.
- CMS (*pour Compact Muon Solenoid*), l'autre grand détecteur, poursuit les mêmes buts scientifiques qu'ATLAS mais avec d'autres options techniques.

Deux autres programmes poursuivent une recherche spécifique :

- Alice (pour *A large ion Collider Experiment*) tentera de recréer, en laboratoire, les conditions qui régnaient juste après le **big bang** et ainsi étudier l'évolution de la matière de la naissance de l'Univers à nos jours.
- LHCb (pour *Large hadron Collider beauty*) essaiera de comprendre pourquoi nous vivons dans un Univers apparemment constitué entièrement de matière, sans aucune présence d'**antimatière**.



CEA

Figure 1.
Simulation d'un événement mettant en jeu la « supersymétrie » dans l'expérience Atlas : vue transverse à l'axe des faisceaux. Dans cet événement, deux LSP et deux jets de particules ordinaires ont été produits. Les LSP ne sont pas détectés directement mais le bilan des impulsions montre un déficit : il manque « quelque chose » du côté gauche ; ce bilan permet de caractériser leur présence.
Les axes sont simplement géométriques : X, Y et leur unité en mètre : X (m) et Y (m).

L'énergie des collisions du LHC (14 TeV, soit 7 fois plus que le collisionneur précédent, actuellement en service aux États-Unis) contribuera à l'exploration complète de l'échelle d'énergie couvrant les alentours de 1 TeV, une échelle clé dans le **Modèle standard**. Le premier objectif des expériences conduites au LHC reste la découverte du mystérieux boson de Higgs ou de ce qui en tient lieu pour l'unification des **interactions électromagnétique et faible**. Mais aujourd'hui, de nouvelles théories ouvrent un cadre plus large que le Modèle standard pour essayer de répondre aux questions que celui-ci laisse en suspens, notamment sur la nature du fameux boson de Higgs, mais aussi de la **matière noire** et de l'**énergie noire**.

Toutes ces questions semblent, en effet, reliées par une interrogation centrale : quelle est l'origine de la masse des particules ? Pour l'énergie noire, les chercheurs se heurtent à un obstacle majeur : au regard des connaissances actuelles sur les particules élémentaires, le calcul de sa densité dans l'Univers donne un résultat beaucoup trop grand, des milliers de fois supérieur à l'observation ! En revanche, la situation semble plus favorable pour la compréhension de la matière noire. En effet, les mesures cosmologiques pointant vers des particules massives qui interagissent faiblement, leur échelle de masse « typique » serait d'environ 100 GeV, soit l'échelle d'unification du Modèle standard. Il semble donc naturel de conclure que la matière noire et l'unification électrofaible partagent une origine commune. Dans cette éventualité, de telles particules pourraient être produites par le LHC. C'est ce que prédit, par exemple, l'une des nombreuses théories avancées pour dépasser le Modèle standard, et sans doute la plus connue, à savoir celle de la « **supersymétrie** », proposée dans les années 1970 mais demeurée hypothétique. De nombreuses versions existent mais, de façon générale, la LSP (pour *Lightest Supersymmetric Particle*), particule supersymétrique la plus légère, ferait une excellente « candidate ». Ainsi, grâce à son énergie et sa **luminosité** élevées, le LHC pourrait prochainement mettre en évidence la supersymétrie. Le point commun entre les différents types d'événements prédits par les théories de supersymétrie réside dans le fait qu'il existe, dans le bilan de la collision, un manque d'énergie (transverse), emportée par une ou plusieurs LSP. Les chercheurs espèrent observer rapidement ces événements manquant d'énergie transverse. Comparé au bruit de fond du Modèle standard, le moindre excès constaté serait alors favorable à la théorie de la supersymétrie. De façon similaire, d'autres théories (dimensions supplémentaires, axions, etc.) prédisent que si la matière noire et l'unification électrofaible partagent la même origine, alors il existe une chance tangible pour que le LHC produise la, ou les particules constitutives de la matière noire de l'Univers.

PStroppa/CEA

L'expérience Alice, dédiée à l'étude de la matière dans ses états extrêmes.

> Bruno Mansoulié
Service de physique des particules (SPP)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay (Gif-sur-Yvette)

2. L'Univers sous la domination de l'énergie noire

Astrophysique et observation de l'énergie noire

Une des plus grandes surprises de la cosmologie moderne restera, sans nul doute, la découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers, due à ce que les chercheurs nomment énergie noire. Son existence a été confirmée par les résultats majeurs apportés par le télescope Canada-France-Hawaii (CFHT) auquel les équipes de l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu) ont contribué tant au plan instrumental que dans l'analyse des données.

Jean-Charles Cuillandre/CFHT

Télescope Canada-France-Hawaii (à droite sur la vue).

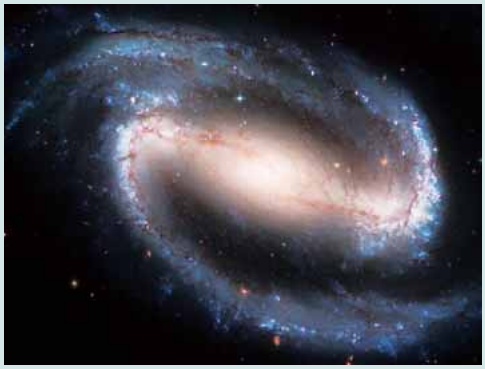
Du big bang à l'expansion accélérée de l'Univers

Au XXe siècle, la **cosmologie** a considérablement progressé grâce aux observations qui ont conduit à la découverte de l'expansion de l'Univers et du **fond diffus cosmologique**, ainsi qu'à l'accord entre les mesures et les prédictions pour les abondances des éléments légers. Ainsi, étape par étape, ces observations contribuent-elles à valider le modèle du **big bang** (encadré 1). Ce qui ne signifie pas que tous ses secrets en soient dévoilés pour autant puisque d'autres observations laissent supposer l'existence d'une **matière noire** dans l'Univers dont la nature demeure pour l'instant inconnue.

À ce mystère s'en ajoute un autre. En raison de l'attraction universelle, l'expansion de l'Univers devrait

Les étapes principales du modèle du big bang — 1

Associé à la **relativité générale** d'Albert Einstein et à la physique nucléaire, le modèle du **big bang** fait naître l'Univers d'une singularité initiale : l'explosion d'un grain de matière dense et chaud. D'où une expansion au cours de laquelle l'Univers se serait dilaté régulièrement et refroidi, condition pour que s'opère la synthèse des premiers **noyaux atomiques** (**hydrogène** et **hélium**) produite essentiellement dans les trois premières minutes après le big bang. À cette étape, dite de la *nucléosynthèse primordiale*, succéda une période d'équilibre entre la matière et le rayonnement dont l'effet fut de détruire les édifices atomiques plus complexes dès leur création par la matière. Après 380 000 ans environ, l'Univers se trouvant suffisamment refroidi et la formation des atomes n'étant plus contrariée par le rayonnement, la matière et le rayonnement se sont alors découplés pour suivre des évolutions différentes. Ainsi libéré, le rayonnement a traversé l'Univers où il subsiste encore sous la forme de rayonnement fossile à basse énergie, appelé **fond diffus cosmologique**. Quant à la matière, sous l'effet de l'attraction universelle, ses atomes se sont regroupés en de gigantesques nuages gazeux. En s'effondrant, ils donnèrent naissance aux premières **étoiles**, puis aux premières **galaxies**, 600 millions d'années après le big bang. L'effet de l'explosion initiale se fait toujours sentir sur ces objets qui s'éloignent les uns des autres avec une vitesse proportionnelle à leur distance.



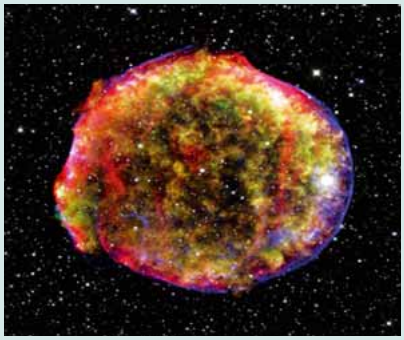
ESA/NASA

C'est en comparant les distances et les vitesses (déduites des mesures de luminosité et de décalage spectral) de plusieurs dizaines de galaxies, qu'Edwin Hubble découvrit, en 1929, que l'Univers était en expansion : les galaxies s'éloignent de nous avec une vitesse proportionnelle à leur distance. À partir de cette loi, on peut déduire l'âge de l'Univers : 13,8 milliards d'années environ.

Les supernovae de type Ia, des chandelles standard

2

Les **supernovae** de type Ia (SNIa), observées jusqu'à ce jour, montrent des propriétés spectrales et lumineuses très homogènes. D'où l'hypothèse qu'elles proviennent de l'explosion thermonucléaire d'une **naine blanche**, étoile en fin de vie, **accrétant** la matière d'une étoile compagne géante. Cette naine blanche gagne en masse jusqu'à approcher la **limite dite de Chandrasekhar**. La température interne de l'étoile s'élève alors suffisamment pour déclencher une combustion nucléaire explosive. À partir de là, les éléments situés au cœur de l'étoile (carbone et oxygène essentiellement) brûlent en donnant du ^{56}Ni. Cette combustion dégage une telle énergie que l'étoile finit par exploser. La désintégration ultérieure du ^{56}Ni en ^{56}Co, puis en ^{56}Fe, définit la **luminosité** de la supernova et la rend aussi brillante que plusieurs milliards de **soleils**, soit l'équivalent d'une petite galaxie. Comme la masse de l'étoile, et par suite la quantité de nickel produite, est pratiquement toujours la même lors de l'explosion, les SNIa présentent des luminosités similaires. On peut alors les utiliser comme des « chandelles standard » pour mesurer des distances, car leur flux apparent ne dépend que de la distance parcourue par les **photons** entre l'instant de l'explosion et celui de l'observation.



CFHT

Image du résidu de la supernova Ia, observée par Tycho Brahe, en 1572. Cette image combine des observations en rayonnements X, infrarouge et optique. Le résidu de la supernova se présente comme un nuage chaud en expansion rapide, formé de nombreux débris (visibles en vert et jaune), à l'intérieur d'une coquille d'électrons de très haute énergie (en bleu) provenant de l'onde de choc extérieure provoquée par l'explosion. La poussière entourant le résidu (créée lors de l'explosion ou préexistante) émet dans l'infrarouge (visible en rouge sur le cliché).

se ralentir. Pour le vérifier, les astrophysiciens ont observé le flux de **supernovae** de type Ia (SNIa), explosions d'**étoiles** en fin de vie, situées à plusieurs milliards d'**années-lumière**. Leur intérêt réside dans leur **luminosité** pratiquement reproductible (encadré 2). La mesure de leur flux apparent revient donc à mesurer la distance parcourue par les **photons** depuis l'explosion – distance qui dépend du contenu de l'Univers et de sa géométrie. Or, à la fin des années 1990, les premières observations de SNIa lointaines révèlent que leur flux apparent s'avère plus faible que prévu dans un Univers exclusivement composé de matière. La distance parcourue par les photons émis par les supernovae est donc plus importante que prévue. Pour les chercheurs, force est d'admettre qu'il existe dans l'Univers une composante énergétique capable d'accélérer l'expansion et qui ne soit ni matière ni rayonnement. Une telle composante a été prévue par les équations de la **relativité générale** d'Albert Einstein à la condition d'y ajouter une constante, dite « **constante cosmologique** ». D'autres descriptions existent et donnent à cette composante un contenu plus fondamental. En attendant de pouvoir trancher, cette composante a reçu le nom d'**énergie noire**. Sa densité représente trois quarts du contenu énergétique de l'Univers, contre un quart seulement pour la matière.

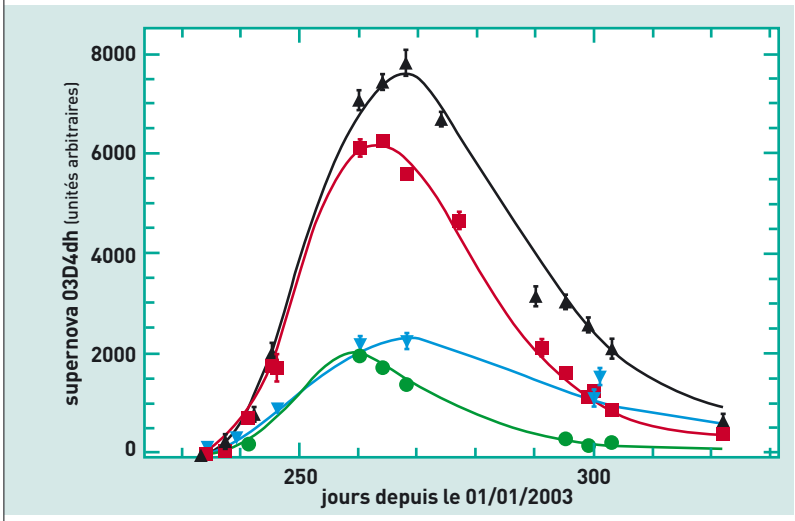


Figure 1.
Courbe de lumière de la supernova 03D4dh mesurée par SNLS (le flux est exprimé en unités arbitraires). Les mesures sont effectuées, tous les 3 à 4 jours, en dehors des périodes de pleine lune dans quatre filtres distincts : bleu (ronds), vert (carrés), rouge (triangles pointe en haut) et proche infrarouge (triangles pointe en bas).

Le relevé de supernovae par le CFHT

Ce résultat étant inattendu, les chercheurs ont lancé de nouvelles études sur les SNIa lointaines dont l'expérience *Supernova Legacy Survey* (SNLS). De 2003 à 2008, grâce au télescope Canada-France-Hawaii, de 3,6 mètres de diamètre (situé à Hawaii), SNLS a détecté et mesuré un millier de SNIa, contre une cinquantaine dans les expériences antérieures. Ce résultat s'avère d'autant plus probant que les SNIa sont rares : à peine une explosion par siècle pour une **galaxie** comme la nôtre. Pour les déceler, SNLS a bénéficié de la caméra à grand champ MEGACAM, caméra CCD de 340 millions de **pixels**, conçue à l'Irfu. Instrument unique au monde, son champ de 1 degré carré (soit quatre fois la pleine Lune) permet d'observer, en une seule fois, de grandes portions du ciel, susceptibles de contenir jusqu'à une dizaine de supernovae. SNLS revenant constamment sur ces champs tant qu'ils sont observables, les détections peuvent se poursuivre toute l'année et les « candidates » être suivies tout ce temps-là. D'où la possibilité de reconstruire le profil temporel de leur émission lumineuse, appelée « courbe de lumière ». Les mesures de flux s'effectuent tous les trois ou quatre jours, à partir de quatre filtres allant du rayonnement optique au rayonnement infrarouge proche (figure 1). Cet échantillonnage perfectionne notablement les programmes antérieurs qui ne suivaient les supernovae qu'à plusieurs semaines d'intervalle et avec seulement deux filtres. Enfin, dès sa détection par SNLS, toute supernova potentielle, proche de

son maximum de lumière, est observée par des spectrographes sur des télescopes de 8 à 10 mètres de diamètre (VLT, Keck, Gemini) pour déterminer précisément son décalage spectral et son type (thermonucléaire pour les Ia ou gravitationnel). Les supernovae gravitationnelles étant peu exploitables pour la cosmologie en raison de leur grande variabilité lumineuse, seules les Ia sont sélectionnées après spectroscopie. À l'issue du relevé, SNLS dénombre 500 SNIa confirmées par spectroscopie, de décalages spectraux allant de 0,2 à 1,2. Cela signifie que leur formation a eu lieu dans un univers plus jeune de 2 et 8 milliards d'années environ. Ces supernovae remontent donc au très lointain passé de l'Univers. Pour parvenir jusqu'à nous, leur lumière a franchi des distances considérables de plusieurs milliards d'années-lumière. Or, sur de telles distances, le parcours des photons dépend significativement de l'évolution passée de l'Univers. En conséquence, mesurer le flux des SNIa sur une gamme étendue de décalages spectraux, revient à remonter l'évolution passée de l'Univers, elle-même déterminée par son contenu en matière et énergie. Cette opération a été entreprise par SNLS dès la première année d'observations, sur la base de 70 SNIa confirmées par spectroscopie. Les mesures montrent que le flux provenant des SNIa lointaines s'avère plus faible que celui attendu dans un Univers dominé par la matière. En revanche, ces mesures s'accordent avec les résultats d'un Univers en expansion accélérée, dominé à 74 % par l'énergie noire (figure 2).

Les données transmises par SNLS permettent aussi de tester l'évolution temporelle de la densité d'énergie noire. Perçue comme un fluide emplissant tout l'espace, l'énergie noire se caractérise par sa pression. Le rapport entre cette pression et la densité, noté *w* et appelé « paramètre de l'**équation d'état** de l'énergie noire », gouverne l'évolution temporelle de la densité d'énergie noire. Une valeur $w = -1$ correspond à une densité d'énergie noire constante dans le temps. Les résultats de la première année de SNLS, couplés à ceux d'autres observations, conduisent à une valeur de *w* compatible avec *-1*, pour une incertitude relative de 10 % (figure 4, gauche). L'analyse des trois premières années de données de SNLS (soit 250 SNIa) s'achève et les conclusions vont dans ce même sens, avec une précision accrue : 6 % au lieu de 10 %. Affiner ce test reste un enjeu majeur : une densité d'énergie noire constante dans le temps favoriserait une interprétation en termes de constante cosmologique.

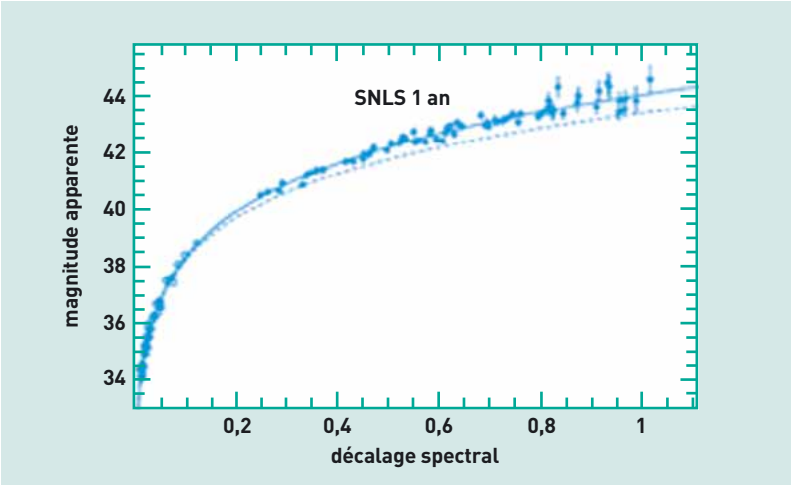


Figure 2.
Magnitude apparente des SNIa (déduite du flux lumineux au pic) en fonction de leur décalage spectral (Il est d'usage, en astrophysique, d'exprimer les flux lumineux sur une échelle logarithmique inversée, dite échelle des magnitudes : plus un objet est lumineux, plus faible sera sa magnitude). Les mesures réalisées lors de la première année de fonctionnement du SNLS (points) associées à des mesures sur des supernovae proches (cercles) sont comparées aux prédictions pour un Univers composé exclusivement de matière (courbe pointillée) et pour un univers en expansion accélérée, composé de 74 % d'énergie noire et de 26 % de matière (courbe en trait plein).

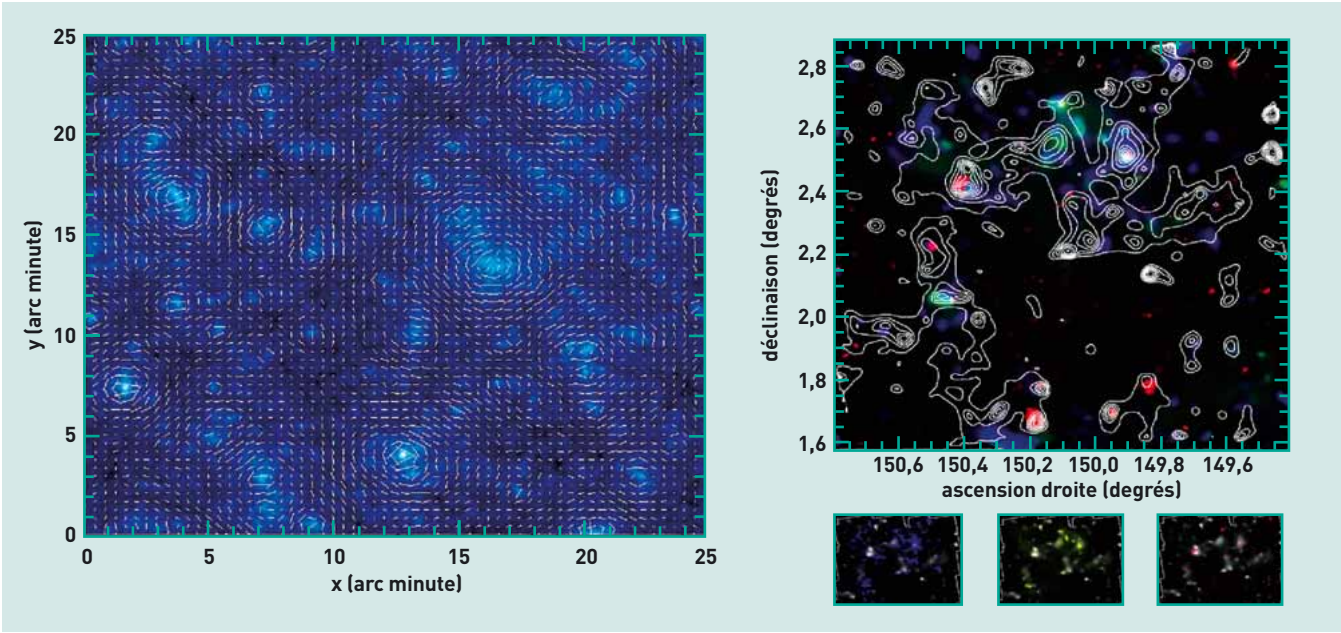


Figure 3.
Cartographie de la matière noire grâce à l'effet de cisaillement gravitationnel.
Gauche : image résultant d'une simulation numérique montrant la distribution de matière noire (échelle de couleurs) et le cisaillement gravitationnel auquel sont soumises les images de galaxies lointaines (segments) ; « x » et « y » étant les coordonnées dans le plan de l'image.
Droite : cartographie de la matière noire en coordonnées galactiques (contours) et visible (couleurs) dérivée par la technique de cisaillement gravitationnel à partir des observations du projet COSMOS (pour *Cosmic Evolution Survey*) avec le télescope spatial Hubble.

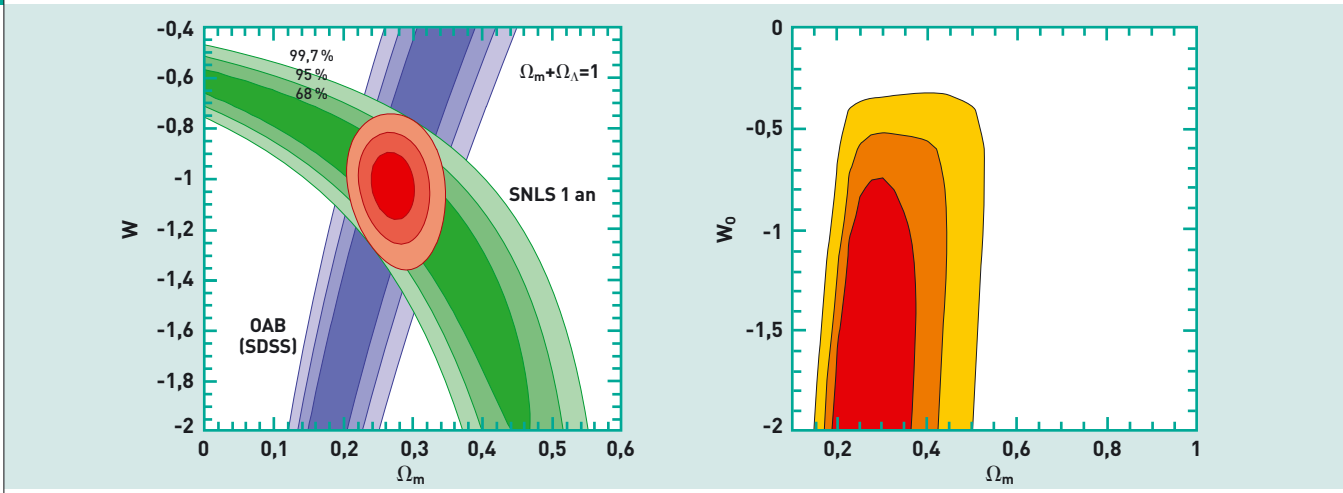


Figure 4.
Contraintes actuelles sur l'énergie noire tirées des études au CFHT (supernovae à gauche, cisaillement gravitationnel à droite) et des mesures du SDSS (pour *Sloan Digital Sky Survey*), sur les oscillations acoustiques baryoniques (OAB). Les contraintes sont exprimées en termes de pourcentage de densité de l'Univers sous forme de matière noire (Ω_m=1- Ω_Λ où Ω_Λ est la densité d'énergie noire) et du paramètre *w* (ou w_0) de l'équation d'état de l'énergie noire (rapport entre pression et densité d'énergie noire).

Mesure de l'effet de cisaillement gravitationnel par le CFHT

Deux autres observations cosmologiques devraient permettre de gagner encore en précision :

• l'étude des **oscillations acoustiques baryoniques**, c'est-à-dire les fluctuations du **plasma** matière/rayonnement dans l'Univers **primordial**, lesquelles ont laissé leur empreinte dans la répartition des galaxies ;

• l'étude de la cartographie de la matière de l'Univers par l'effet de cisaillement gravitationnel. Elle se fonde sur la mesure des formes de galaxies lointaines, déformées par les grandes structures de l'Univers sur la ligne de visée. Cette technique généralise, à grande échelle, la méthode des mirages gravitationnels, utilisée pour reconstruire la distribution de masse des amas et révéler leur contenu en matière noire. Le cisaillement gravitationnel contribue à décrire la distribution de matière noire à l'échelle de l'Univers (figure 3). À l'aide du décalage spectral, déduit des couleurs des galaxies dans plusieurs bandes de longueurs d'onde, cette cartographie s'effectue en trois dimensions – la mesure des propriétés statistiques de l'histoire de la formation des structures de l'Univers n'en devient que plus précise. Le plus important relevé de l'effet de cisaillement gravitationnel a été obtenu grâce à la caméra MEGACAM du CFHT, à partir de l'analyse du relevé « grand champ » effectué pendant la campagne d'observations 2003-2008. Ce relevé a permis de mesurer la densité de l'énergie noire à partir de son effet sur la géométrie de l'Univers et sur le taux de croissance de ses structures. La figure 4 (droite) expose les contraintes obtenues à partir des premiers 20 degrés carrés de ce relevé, qui concordent avec celles déduites des supernovae et des oscillations acoustiques baryoniques. À terme, le relevé de l'effet de cisaillement gravitationnel étendra de dix fois sa surface et posera des contraintes plus précises sur l'énergie noire.

Perspectives

Des mesures encore plus fines devraient clarifier définitivement le comportement de l'énergie noire. En effet, les expériences actuelles ne sont sensibles qu'à la valeur moyenne de *w* sur la gamme des décalages spectraux observés. Les expériences futures auront à tenir compte d'une évolution possible de *w* avec le décalage spectral. Il s'agit du seul moyen de distinguer entre une pure constante cosmologique et un modèle plus dynamique d'énergie noire. L'Irfu prépare deux expériences sur la question :

• la première consiste en un relevé des oscillations acoustiques baryoniques du ciel entier et à trois dimensions, par interférométrie radio. La détection de la raie à 21 cm de l'**hydrogène** neutre, amènera à remonter à la répartition des galaxies jusqu'à un décalage spectral de 2. Avec une **résolution** angulaire d'une minute d'arc et une résolution de 0,001 sur le décalage spectral, l'interféromètre HSHS (pour *Hubble Sphere Hydrogen Survey*) devrait atteindre une sensibilité de 25 % sur l'évolution de *w*, à l'échéance de quelques années ;

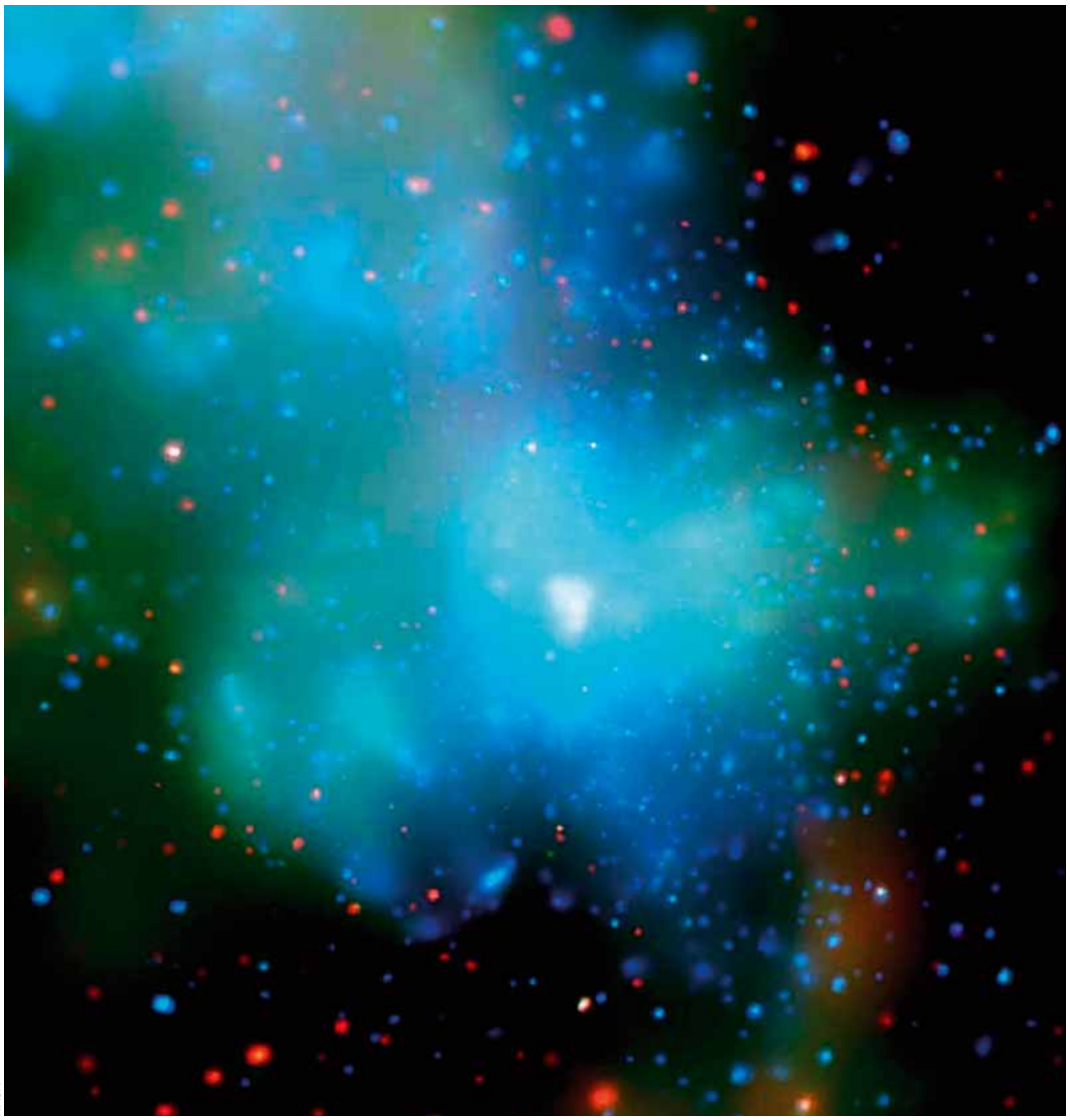
• la deuxième vise le plus long terme avec un imageur spatial grand champ, appelé Euclid. Cet instrument étudiera, avec une très grande précision, l'Univers sombre à l'aide du cisaillement gravitationnel et des oscillations acoustiques baryoniques. Pour cela, il utilisera un télescope de 1,2 m, dont le champ de vision, de 0,5 degré carré, combinera l'imagerie et la spectroscopie dans le visible et le proche infrarouge. La précision souhaitée est de 5 % sur l'évolution de *w*, ce qui permettra de différencier des modèles d'énergie noire dérivant de modifications de la théorie de la relativité générale (voir *Les télescopes du futur*, p. 102).

> Vanina Ruhlmann-Kleider
Service de physique des particules
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay (Gif-sur-Yvette)

> Alexandre Réfrégier
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Théories de l'énergie noire

Si les observations sur l'accélération de l'expansion de l'Univers se précisent toujours plus, néanmoins sa description théorique demeure problématique. En effet, plus de dix ans après les premières mesures provenant de l'explosion des supernovae de type Ia, aucune théorie ne peut encore rendre compte de l'ensemble du phénomène. Pire, chacun des scénarios proposés met en défaut les outils théoriques connus.



NASA

L'Univers est composé de matière lumineuse formant les étoiles et les galaxies. Il existe aussi un fond de matière dite noire car non lumineuse dont le halo entoure chaque galaxie. Enfin il semble qu'il existe un troisième type de matière qui conduirait à l'accélération de l'Univers. Cette énergie noire n'est pas lumineuse et se trouve répartie uniformément dans tout l'Univers.

Quelles ont donc été les différentes pistes suivies pour décrire l'accélération de l'expansion de l'Univers et à quelles impasses ont-elles mené ? Pour tenter d'y répondre, il faut prendre pour point de départ que les données d'observations qui ont conduit à la découverte de l'accélération de l'Univers reposent sur la **théorie de la relativité générale**, pilier de la physique du XXe siècle. Élaborée par Albert Einstein, en 1915, celle-ci réconcilie la théorie de la gravité universelle avec celle de la relativité. Depuis, cette hypothèse a souvent été testée, notamment sur des échelles allant du système solaire aux lointaines **galaxies**. Elle a même trouvé une application inattendue avec le système de positionnement GPS ! Mais pour modéliser l'évolution de l'Univers dans son ensemble, il faut considérer des échelles beaucoup plus grandes que celles des plus lointains **amas de galaxies**. À ces distances, l'Univers apparaît isotrope et homogène, c'est-à-dire qu'aucune direction ou aucun lieu ne semble privilégié. Cette observation a été érigée en principe – **le principe cosmologique**. Relativité générale et principe cosmologique sont à la base des théories développées, depuis les années 1930, pour décrire l'histoire de l'Univers, de la formation des **noyaux** au **rayonnement de fond cosmique**.

La relativité générale enseigne qu'énergie et géométrie de l'**espace-temps** sont intimement liées. Par exemple, le Soleil courbe l'espace-temps en son voisinage et dévie les rayons lumineux. En **cosmologie**, la dynamique de l'Univers résulte de la nature et de la quantité d'énergie contenue en son sein.

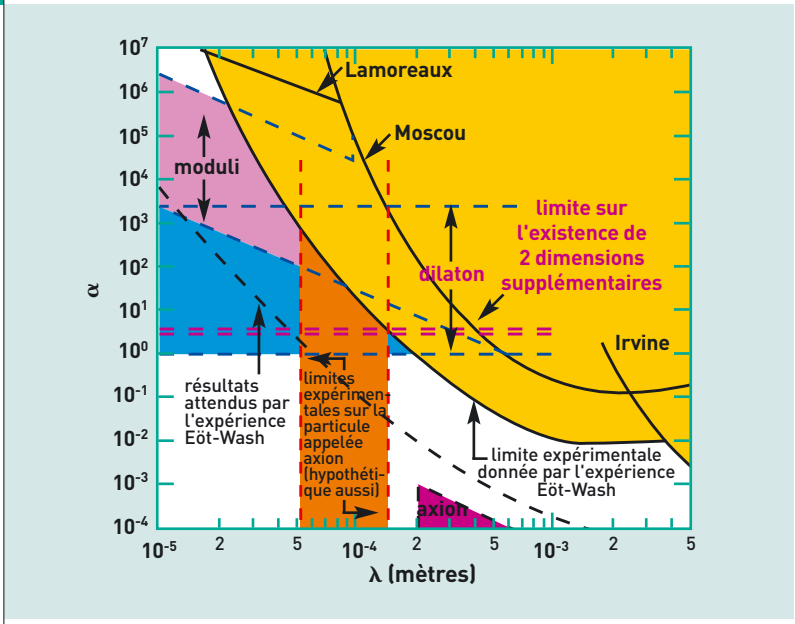


Figure 1.
L'étude de l'attraction gravitationnelle, des plus courtes échelles aux plus grandes distances, est fondamentale pour bien appréhender le problème de l'accélération de l'Univers. La modification de la gravité à petite échelle (ici de l'ordre du millimètre en abscisse) pourrait bien révéler la présence de particules engendrant l'accélération. Ces particules viendraient augmenter la force de gravité d'un pourcentage porté en ordonnée. Les mentions de « Lamoreaux » faites sur ce schéma correspondent à l'expérimentateur dont on présente les résultats et celle d'« Irvine » à l'expérience réalisée dans l'université du même nom (idem pour Moscou). Le dilaton est une hypothétique particule utilisée dans la théorie des cordes : sont données sur le schéma les bornes de son existence (idem pour le moduli). L'axion est une hypothétique particule qui pourrait être à l'origine de la matière noire.

De plus, la relativité générale fait graviter toutes les formes d'énergie, contrairement à l'approche newtonienne où seule gravite la matière. Or, et il s'agit d'une extrême surprise, une phase d'accélération est impossible en relativité générale, sous couvert de validité du principe cosmologique, si le contenu en énergie de l'Univers se réduit à la radiation lumineuse, aux **neutrinos**, à la matière composant les galaxies et au **halo** de **matière noire** les entourant. Engendrer une accélération suppose donc de « violer » l'une de ces hypothèses et de modifier la relativité générale, le principe cosmologique ou le contenu en énergie de l'Univers. Les dix dernières années ont vu fleurir nombre de modèles cherchant à expliquer l'accélération de l'Univers par la modification d'une de ces hypothèses. D'ailleurs, bien avant la découverte de l'accélération de l'Univers, Albert Einstein proposait déjà de modifier la relativité générale. Optant pour une vision aristotélicienne du cosmos, il imaginait une sphère céleste statique. Or, selon la théorie de la relativité générale, celle-ci ne peut pas être immobile : l'attraction gravitationnelle due à la matière qui la compose impliquant sa contraction (figure 1). Pour contrecarrer cet « écroulement gravitationnel », Albert Einstein introduisit un nouveau terme dans les équations, celui de **constante cosmologique** – l'effet attendu étant de stabiliser la sphère céleste et de rendre ainsi l'Univers statique. Néanmoins, quand l'astrophysicien Edwin Hubble découvrit l'expansion de l'Univers, dans les années 1920, et a donc battu en brèche l'hypothèse d'un Univers statique et immuable, l'introduction de la constante cosmologique devint obsolète et ceci, jusque dans les années 1990.

Il aura fallu du temps pour décrire la nature physique de la constante cosmologique. Seulement dans les années 1960, apparaît une équivalence avec la densité d'énergie du vide. En physique classique, le vide signifie une absence de matière et aucune densité d'énergie. Cette perception, la mécanique quantique va la bouleverser. En effet, dans le vide, des particules virtuelles apparaissent, puis disparaissent, avant même d'avoir pu être observées. De cette activité frénétique résulte sûrement l'existence d'une énergie du vide. Une manifestation expérimentale de ce phénomène a été décelée et porte le nom d'*effet Casimir*[1]. Entre deux plaques métalliques, les fluctuations du champ **électromagnétique** créent une force attractive. La mystérieuse constante cosmologique introduite par Albert Einstein reflète ainsi la nature quantique du vide cosmologique. Elle correspond à une modification du contenu en énergie de l'Univers.

L'effet d'une constante cosmologique sur la dynamique d'un Univers en expansion est bien connu depuis les travaux d'Alexander Friedmann et Willem de Sitter[2] dans les années 1920. Alors que la densité d'énergie de la matière et de la radiation décroît avec le temps, la constante cosmologique reste immuablement constante et devient ainsi, au bout d'un certain temps, la portion dominante du contenu en énergie de l'Univers. Lorsque la constante cosmologique domine les autres formes d'énergie, la force répulsive induite par celle-ci ne peut plus être contrebalancée : d'où une période d'expansion accélérée qui s'identifie à celle que l'on observe. La constante cosmologique apparaîtrait donc comme l'explication la plus simple de l'accélération de l'Univers. Puisque celle-ci n'a commencé que « récemment », la constante cosmologique devrait prendre une valeur proche de la densité actuelle de matière de l'Univers. Cette dernière reste très faible : 25 ordres de grandeur de moins que la densité de l'atmosphère et 6 de moins que le vide intergalactique ! L'existence d'une densité d'énergie si minuscule est en conflit avec notre connaissance de la physique des particules. Aussi a-t-il fallu envisager d'autres explications.

Ainsi, la constante cosmologique peut également s'interpréter comme étant la densité d'énergie d'un fluide emplissant l'Univers, dont la pression se trouve exactement à l'opposé de sa densité d'énergie. Le rapport pression/densité d'énergie, appelé « **équation d'état** » vaut alors -1. Plus généralement, l'accélération de l'Univers pourrait encore émaner

(1) Hendrick Casimir (1909-2000), physicien hollandais, directeur des laboratoires Philips et professeur à l'université de La Haye. Spécialiste de la supraconductivité et des diélectriques, il est l'auteur d'un effet qui porte son nom selon lequel deux plaques métalliques parallèles situées dans le vide s'attirent.

(2)Alexander Friedmann (1888-1925), physicien et mathématicien russe ayant entrevu, le premier, que la théorie de la relativité générale d'Einstein permettrait l'étude de la structure de l'Univers dans son ensemble.
Willem de Sitter (1872-1934), mathématicien, physicien et astronome néerlandais, qui a été l'un des premiers à évoquer, en 1917, la possibilité d'un Univers en expansion, sur la base des travaux de la relativité générale d'Einstein.

de la présence d'un nouveau type de matière découverte dans l'Univers : l'**énergie noire**. Les observations contraignent son équation d'état à approcher -1. Si elle descendait à -1, l'Univers deviendrait instable. Mais rien ne l'empêche d'être supérieure à -1 et inférieure à -1/3, valeur maximale au-dessus de laquelle toute accélération devient impossible. La description thermodynamique du fluide régissant l'accélération de l'Univers ne représente que la première étape du processus de modélisation. En effet, si l'équation d'état ne s'établit pas exactement à -1, la densité d'énergie noire ne peut pas demeurer constante dans le temps. Ce comportement se modélise par la théorie d'un **champ scalaire** dont l'énergie potentielle joue le rôle d'énergie noire. Le champ scalaire évolue comme une boule qui roule en étant freinée le long d'une pente douce (figure 2). Après une longue roulade, le champ s'arrête et son énergie potentielle reste constante. C'est elle qui conduit à l'accélération de l'Univers (figure 3). Cette nouvelle forme d'énergie porte le nom de quintessence. Toutes les tentatives pour expliquer l'accélération de l'Univers par une nouvelle composante d'énergie ne résolvent pas, pour autant, le problème de la valeur de la constante cosmologique. L'énergie du vide, due aux fluctuations **quantiques**, s'avérant de 120 ordres de grandeur plus importante que la valeur observée, on peut parler de catastrophe non élucidée. Un mécanisme est donc nécessaire pour éviter celle-ci. Le « candidat » le plus prometteur pourrait être la **supersymétrie**, postulant l'existence de « superpartenaires » associés à chaque particule élémentaire. Alors, l'énergie du vide s'annule exactement. La découverte des « superpartenaires » pourrait intervenir au *Large Hadron Collider* dans les prochains mois. Malheureusement, les « superpartenaires » ayant jusqu'ici échappé aux observations, la supersymétrie ne peut donc pas être considérée comme une symétrie exacte de la nature. Sa brisure réintroduit des fluctuations du vide dont la densité d'énergie reste encore 60 ordres de grandeur trop grande.

Une autre explication a été avancée, celle dite du **principe anthropique** énonçant que l'Univers doit être tel que son observation soit possible. Par exemple, du simple fait que les galaxies se soient formées, découle que la constante cosmologique ne peut excéder 100 fois la densité de matière observée. Les progrès récents de la **théorie des cordes** prédisent l'existence de multiples univers, chacun doté d'une énergie du vide différente. Il devient alors envisageable que notre Univers ne soit que l'un d'entre eux, associé à une petite énergie du vide et hébergeant des observateurs.

Une autre voie consisterait à modifier la relativité générale aux échelles cosmologiques et donc avancer que l'accélération de l'Univers résulterait d'une manifestation des lois régissant la gravité à très longue distance. Mais cette hypothèse se heurte elle-même à d'autres obstacles. Comme toutes les théories physiques décrivant les quatre interactions fondamentales, la relativité générale est une théorie **lagrangienne** dont les équations se déduisent du principe de moindre action. Modifier la relativité générale revient à changer le caractère lagrangien de la théorie. Or le **théorème d'Ostrogradski** stipule que cela conduit à des théories non physiques, par exemple : le vide est instable. Une seule famille de théories échappe à ce résultat, mais elle généralise des modèles de quintessence et souffre des mêmes défauts.

Une autre éventualité a été encore explorée, celle de la « violation » du principe cosmologique. Si la mesure du rayonnement de fond cosmique prouve que l'Univers est isotrope, l'homogénéité du cosmos reste hypothétique. L'accélération du mouvement des **supernovae** pourrait découler de certaines inhomogénéités locales. Pire, le principe de Copernic, qui sous-tend l'hypothèse d'homogénéité et stipule que

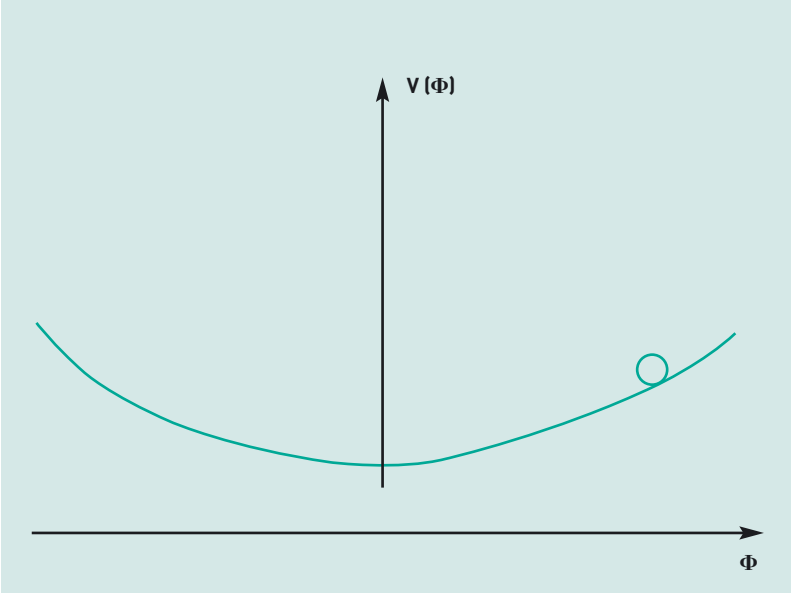


Figure 2.
La dynamique des champs scalaires qui pourraient être responsables de l'accélération s'apparente au mouvement d'une bille roulant le long d'une pente et soumis à un frottement. Après avoir dévalé la pente, la bille se stabilise au minimum potentiel. Si l'énergie est positive, celle-ci sert de réservoir d'énergie pour l'accélération.

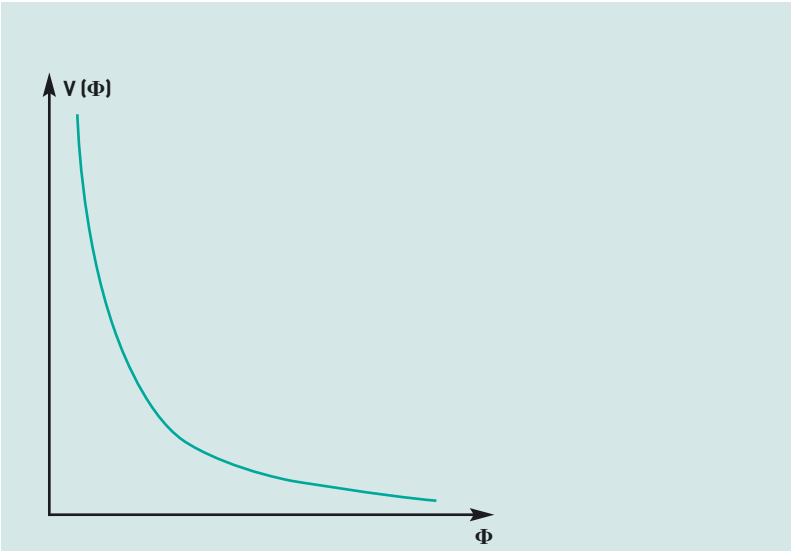


Figure 3.
Si le potentiel n'a pas de minimum, le champ scalaire roule le long de la pente avant de se stabiliser. L'énergie potentielle résiduelle conduit à l'accélération de l'Univers. L'énergie potentielle de l'énergie noire se représente par V (Φ) alors qu'en abscisse nous avons la valeur du champ d'énergie noire Φ.

la terre n'occupe pas de position privilégiée dans l'Univers, serait lui aussi remis en cause : autant refonder toute la cosmologie à partir des espaces de Tolman-Bondi[3] (et non plus de Friedmann-Lemaitre[4]) dont la principale caractéristique est d'avoir une courbure variant spatialement autour d'un centre qui occupe une position particulière dans l'Univers. Il s'agit de scénarios qui ne sont pas encore complètement exploités et demeurent parcellaires.

Au final, il existe une autre hypothèse sous-jacente dans l'interprétation de l'accélération de l'Univers. Elle se base sur les quatre dimensions de l'espace-temps. D'abord, dès les années 1920, Kaluza et Klein ont introduit une cinquième dimension et ainsi tenté d'unifier la relativité générale et l'électromagnétisme. Plus tard, la théorie des cordes a introduit, à son tour, dix ou onze dimensions suscitant deux types de modèles. Le premier d'entre eux suppose que notre Univers figure le bord (appelé **brane**) d'un espace à cinq dimensions. Si cette hypothèse se trouvait avérée, alors l'énorme énergie du vide, due aux fluctuations quantiques sur la brane, aurait pour effet de courber la cinquième dimension en laissant une infime trace qui conduirait à l'accélération de l'Univers. Très prometteur, ce

(3) Richard Tolman (1881-1948), physico-chimiste et cosmologiste américain qui fut le premier à s'intéresser aux perturbations cosmologiques.
Herman Bondi (1919-2005), mathématicien autrichien connu pour avoir développé la théorie équilibrée de l'Univers.

(4) Alexandre Friedman (1888-1925), physicien et mathématicien russe, et Georges Lemaître (1897-1960), astrophysicien belge, sont deux des pères de la théorie de l'expansion de l'Univers.

Asymétrie matière-antimatière de l'Univers

Étoiles, **galaxies**, **amas**... Toutes les structures observées se composent de **baryons** (**protons** et **neutrons**) et d'électrons, c'est-à-dire de matière, sans présence significative d'**antimatière**. Cette asymétrie matière/antimatière se mesure par le rapport de la densité de baryons à la densité de **photons**, $\eta \equiv n_B/n_\gamma = (6{,}21 \pm 0{,}16).10^{-10}$, qui décrit l'**asymétrie baryonique** de l'Univers. On la détermine par deux méthodes indépendantes. La première repose sur la mesure des abondances des éléments légers D, ^{3}He, ^{4}He et ^{7}Li qui sont prédites en fonction du paramètre η par la nucléosynthèse. Le fait qu'il existe un même intervalle de valeurs de η compatible avec les abondances de ces quatre éléments ($\eta = (4{,}7 - 6{,}5)\cdot 10^{-10}$) demeure l'un des grands succès de la théorie du big bang. La deuxième mesure de η, plus précise, est extraite des **anisotropies** du **rayonnement cosmique** de fond, et correspond à la valeur donnée plus haut. La remarquable concordance de ces deux mesures représente un autre grand succès de la théorie du big bang (figure 1).

Petit en apparence, le paramètre η s'avère, en réalité, très grand. Pour le comprendre, supposons, dans un premier temps, que l'Univers contienne initialement le même nombre de baryons et d'antibaryons. Dans ce cas, leur annihilation mutuelle conduirait à $n_B / n_\gamma \sim 10^{-19}$, bien en dessous de l'asymétrie baryonique observée. Cette dernière pourrait-elle alors s'expliquer par un excès de baryons sur les antibaryons au moment du big bang ? Cette hypothèse se heurte à deux objections. Premièrement, il faudrait ajuster finement (à 10^{-9} près) les densités initiales de baryons et d'antibaryons. Ensuite, il faudrait supposer que l'Univers n'a pas connu de phase d'inflation, contrairement à ce que suggèrent les observations (l'inflation a pour effet d'effacer toute mémoire des conditions initiales). Or, si l'asymétrie baryonique n'est pas due aux conditions initiales, elle doit avoir été créée dynamiquement au cours de l'histoire de l'Univers : c'est ce que l'on nomme la **baryogenèse**. En 1967, Andreï Sakharov[1] montrait que trois conditions devaient être réunies pour qu'elle puisse avoir lieu :

- l'existence de processus ne conservant pas le nombre total de baryons ;
- à l'équilibre thermique, les processus créant des baryons se produisent au même taux que les processus inverses qui détruisent la symétrie créée par les premiers : il faut donc un écart à l'équilibre thermique ;
- à tout processus créant des baryons est associé, par ce que les physiciens des particules appellent « conjugaison de charge » (C) et « conjugaison de charge-parité » (CP), un processus « miroir » créant des antibaryons ; pour qu'une asymétrie baryonique subsiste, ces deux processus doivent avoir des taux différents, ce qui nécessite une violation de C et de CP au niveau des interactions entre les particules.

Fait remarquable, les conditions énoncées par Andreï Sakharov se trouvent satisfaites dans le **Modèle standard** de la physique des particules. En effet, certains processus connus sous le nom de sphalérons ne conservent pas le nombre de baryons ; les symétries C et CP sont violées par les interactions responsables de la désintégration bêta ; l'écart à l'équilibre thermique survient lors de ce que l'on appelle la « transition de phase électrofaible », c'est-à-dire la période de l'histoire de l'Univers au cours de laquelle les particules acquièrent leur masse. Le scénario de baryogenèse correspondant, connu sous le nom de « baryogénèse électrofaible », échoue néanmoins à engendrer le niveau d'asymétrie baryonique observé, la violation de CP et l'écart à l'équilibre thermique étant trop faibles. Il faut alors recourir à une nouvelle physique au-delà du Modèle standard qui fait, par ailleurs, l'objet d'actives recherches dans les collisionneurs.

Actuellement, les théoriciens étudient deux classes de scénarios. Dans la première, la nouvelle physique affecte la transition de phase électrofaible et permet ainsi d'obtenir l'écart nécessaire à l'équilibre thermique. Dans la seconde, l'asymétrie baryonique est créée avant la transition électrofaible. Par exemple, dans le scénario de **leptogenèse**, la désintégration des neutrinos lourds (par ailleurs impliqués dans la génération des masses des **neutrinos** du Modèle standard) engendre une asymétrie leptonique qui est ensuite partiellement convertie en asymétrie baryonique par les sphalérons.

(1) Andreï Sakharov (1921-1989), physicien nucléaire russe et militant des droits de l'Homme, prix Nobel de la paix en 1975.

> **Stéphane Lavignac**
Institut de physique théorique
(Unité de recherche associée au CNRS)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay

scénario se heurte néanmoins à la présence de singularités de l'espace-temps. Le deuxième modèle pressenti envisage que la gravité se propage à la fois sur la brane et dans la cinquième dimension. Elle s'en trouverait alors modifiée à longue distance. Comme dans les théories à quatre dimensions, ce modèle souffre d'une instabilité du vide. La construction de théories incluant des dimensions supplémentaires n'a donc pu encore fournir la clé de l'accélération de l'Univers.

Ce recensement des explications de l'accélération de l'Univers atteste de la difficulté que présente l'élaboration d'une théorie physique de ce phénomène. Néanmoins, de la confrontation de ces différentes hypothèses en présence, pourraient bien jaillir de grandes avancées dans la compréhension des liens entre cosmologie, gravitation et physique des particules. Mais à ce jour, le mystère de l'accélération de l'Univers reste entier. Le problème de l'accélération de l'Univers est étudié à l'Institut de physique théorique situé sur le centre du CEA à Saclay. Son lien avec les théories de particules, la théorie des cordes et la gravité y est analysé. La présence, à Saclay, d'équipes de physiciens des particules et d'astrophysiciens engagés dans des programmes expérimentaux sur l'accélération de l'Univers représente un atout. Ceci permet un dialogue régulier entre expérimentateurs et théoriciens.

> Philippe Brax
Institut de physique théorique
(Unité de recherche associée au CNRS)
Direction des sciences de la matière
CEA Centre de Saclay

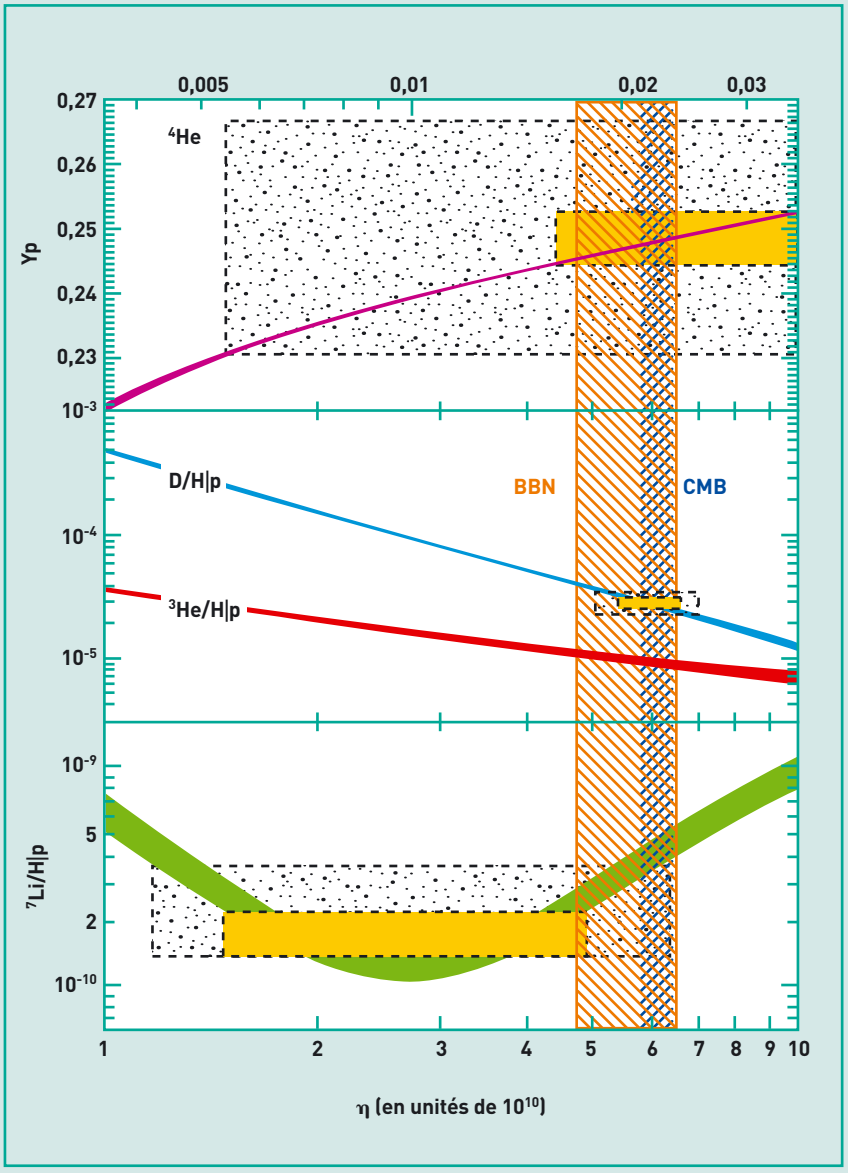


Figure 1.
Abondances des éléments légers ^{4}He (conventionnellement notées Y_p), D, ^{3}He et ^{7}Li prédites par la nucléosynthèse dans le cadre de la théorie du big bang (BBN en anglais), en fonction du paramètre η en unités de 10^{10}. Les rectangles horizontaux indiquent les abondances observées avec leurs incertitudes expérimentales (petits rectangles : erreur statistique; grands rectangles : erreurs statistique et systématique). Les bandes verticales correspondent à la valeur de η tirée des abondances observées (hachures oranges) et des anisotropies du rayonnement cosmique de fond (CMB en anglais ; hachures bleues).

Voyage dans les **lumières de l'Univers**

Pendant longtemps, les astrophysiciens n'ont eu à leur disposition que la lumière visible pour observer l'Univers. **Aujourd'hui, grâce aux observatoires spatiaux, ils disposent d'une panoplie d'instruments capables de capter toutes les lumières de l'Univers**, des ondes radio aux rayonnements gamma.

1. Micro-ondes

ESA Planck Surveyor

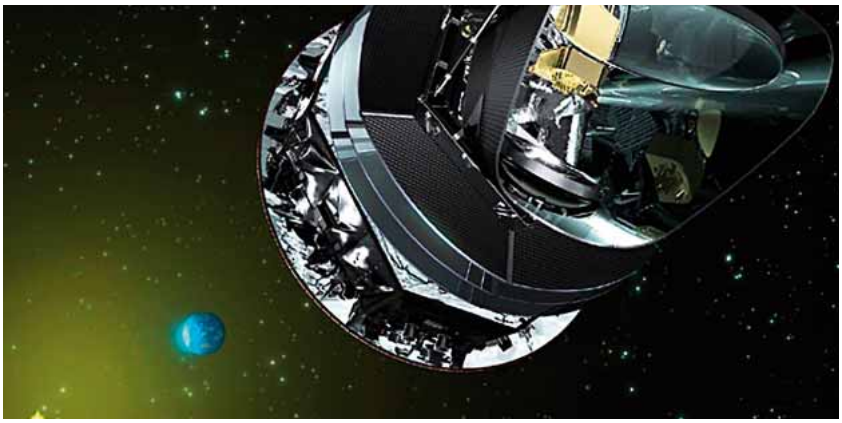
Ce satellite doit cartographier le fond diffus cosmologique, rayonnement émis il y a 13,7 milliards d'années, quand l'Univers est devenu transparent à la lumière. Ce rayonnement suit la loi de répartition spectrale des corps noirs établie par le physicien allemand Max Planck (1858-1947), au début du XXe siècle.

Domaine spectral
Fréquences de 30 GHz à 857 GHz correspondant à des longueurs d'onde de 1 cm à 350 microns.

Description
- Télescope de 1,5 m de diamètre.
- Dimensions : 4,20 m de haut et de large.
- Poids : 1,8 tonne.
- Lancement : par la fusée Ariane 5, le 14 mai 2009, à partir du Centre spatial guyanais de Kourou.
- Position : aux alentours du point de Lagrange 2 du système Terre/Soleil (point de Lagrange métastable situé derrière la Terre, à 1,5 million de km de nous).
- Durée de vie de la mission : 21 mois.

Objectifs scientifiques
- Mesurer avec une précision inférieure à 1 % les paramètres du Modèle standard, appelé aussi « modèle du big bang ».
- Détecter d'infimes variations dans les propriétés des fluctuations du fond diffus, à 3 K, par rapport aux prédictions de ce modèle : chaque variation participant à démontrer que la physique à l'œuvre dans l'Univers primordial s'avérerait différente de celle que nous considérons actuellement comme la plus vraisemblable.

Instruments
- *High Frequency Instrument* (HFI), instrument submillimétrique développé sous maîtrise d'œuvre de l'Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay. Il s'agit d'une matrice de bolomètre fonctionnant à une température de 0,1 K, pour une résolution angulaire de 5 minutes d'arc avec une sensibilité en température de 5 µK à 100 GHz. Il observera un domaine en fréquence de 100 à 850 GHz.
- *Low Frequency Instrument* (LFI). Instrument micro-onde développé en Italie, composé de quatre bandes de 56 récepteurs radio ajustables (27 - 77 GHz) fonctionnant à une température de 20 K, sa résolution angulaire est de 10 minutes d'arc et sa sensibilité en température d'environ 12 µK à 100 GHz.


ESA

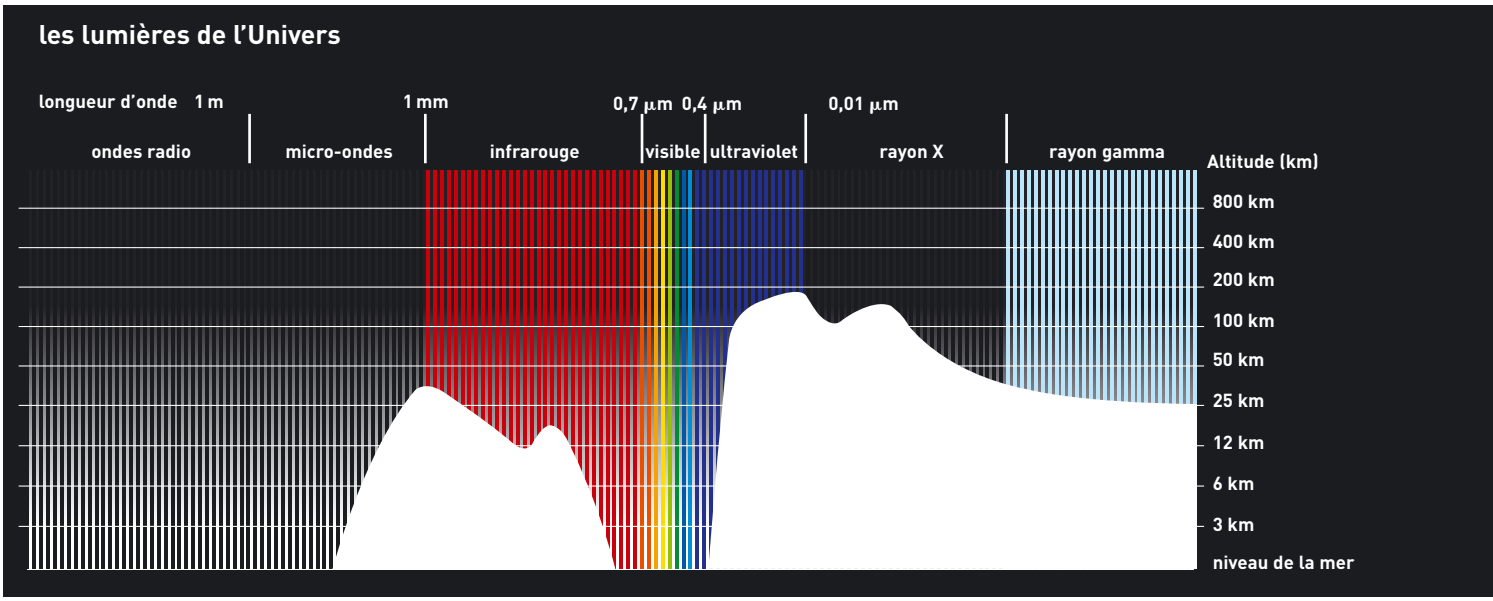
Vue d'artiste du satellite Planck de l'ESA.

Collaborations
Construit par un consortium international avec l'Agence spatiale européenne (ESA) comme maître d'ouvrage.

Rôle du CEA
Participation :
- à la mise en place de l'électronique à bas bruit pendant la phase de construction de la charge utile, en particulier en coordonnant les études de compatibilité électromagnétique de l'instrument HFI ;
- à la mise en place de logiciels sophistiqués pour l'analyse des données ;
- au traitement des données et à l'exploitation scientifique de la mission.

Planck réalise une cartographie des anisotropies du fond diffus cosmologique en balayant l'intégralité de la voûte céleste avec une résolution de cinq arcs minutes. De ces données seront déduites des informations fondamentales sur la naissance, la forme, le contenu et l'évolution de l'Univers.
Le traitement des données représente un vrai défi. En effet, chacune des cartes obtenues contiendra de l'information provenant de différents rayonnements micro-ondes et pas uniquement du fond diffus cosmologique. Il sera donc nécessaire de séparer les informations provenant du fond diffus cosmologique des autres rayonnements micro-ondes.

> Jean-Luc Starck
Service d'électronique des détecteurs et d'informatique (Sedi)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)



Une grande partie des lumières de l'Univers n'atteint pas le sol terrestre. On ne peut les observer qu'au-dessus de l'atmosphère avec ballons, fusées et satellites.

2. Submillimétriques et infrarouges

ArTéMis

D'après l'acronyme d'Architecture de bolomètres pour les télescopes submillimétriques au sol ; cette caméra sera utilisée, entre autres, pour observer des pouponnières d'étoiles comme la nébuleuse de la constellation d'Orion (dans la mythologie grecque Orion aurait tenté de séduire la déesse Artémis).

Domaine spectral

Longueurs d'onde comprises entre 200 µm et 500 µm.

Description

- Dimensions : 1 mètre de haut et de large pour une profondeur de 0,5 m.
- Poids : 250 kg.
- Lancement : pas de lancement.
- Position : à 5100 m d'altitude dans les hauts plateaux du désert d'Atacama au Chili.
- Durée de vie de la mission : pas de limitation matérielle mais durée intimement liée à l'exploitation scientifique du télescope APEX (pour *Atacama Pathfinder Experiment*).

Objectifs scientifiques

Étudier la naissance et les phases précoces d'un large spectre d'objets astrophysiques comme les nuages moléculaires où se forment les étoiles dans la Galaxie, les cœurs préstellaires et les protoétoiles enfouies, les disques protoplanétaires autour de jeunes étoiles ainsi que les galaxies proches de type *starburst* c'est-à-dire « à flambées de formation d'étoiles » et enfin les galaxies à grand *redshift* dans l'Univers primordial.

Instruments

- Une caméra destinée au télescope APEX qui disposera de trois plans focaux pouvant observer simultanément la même région du ciel : 2 304 pixels à 450 µm ; 2 304 pixels à 350 µm ; 1152 pixels à 200 µm.
- Une antenne de 12 m installée au Chili.

Collaborations

L'Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay (IAS), l'Institut Néel de Grenoble, l'Institut d'astrophysique de Paris (IAP) et le CEA.

Rôle du CEA

Réalisation complète de la caméra équipée de ses trois plans focaux formés de plusieurs milliers de pixels bolométriques refroidis à 0,3 Kelvin et développement d'une solution cryogénique autonome intégrée.

Une version prototype de la caméra (256 pixels à 450 µm) a d'abord été réalisée pour valider, dans un premier temps, la technologie novatrice du Leti en matière de bolomètres submillimétriques. Les premières images du ciel, à 450 µm, ont été obtenues avec ce prototype, en 2006, sur le télescope KOSMA (pour *Koelner Observatorium fur Submillimeter Astronomie*), installé à 3 100 m, dans les Alpes Suisses. Depuis, deux campagnes d'observation ont été réalisées sur l'antenne APEX, au Chili, et les premiers résultats scientifiques ont pu être publiés avec cette caméra prototype, préparant la venue de la future caméra ArTéMIS. Avec le prototype, les astronomes ont déjà cartographié l'émission thermique, à 450 microns des grains de poussière, à travers des régions de formation d'étoiles ainsi que les premières images, à cette longueur d'onde, de disques protoplanétaires et de disques de débris. Parmi les régions observées figurent NGC3576, G327.3-0.6, S255, NGC2264, des régions de formation d'étoiles massives, HD97048 (disque protoplanétaire) et Beta-Pictoris (disque de débris).

ESA

Le télescope APEX au foyer duquel sera installée la caméra ArTéMis.

> Michel Talvard
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles
(CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Herschel Space Observatory

Ce grand télescope spatial doit son nom à William Herschel (1738-1822), astronome anglais d'origine allemande, qui découvrit le rayonnement infrarouge en 1800. On lui doit aussi la découverte de la planète Uranus et de ses deux principaux satellites.

Description

- Dimensions : 7 m de haut pour un diamètre de 4,3 m.
- Poids : 3,25 tonnes.
- Lancement : le 14 mai 2009, par une fusée Ariane 5, à partir du Centre spatial guyanais de Kourou.
- Position : au point de Lagrange 2 du système Terre/Soleil.
- Durée de vie de la mission : 3 ans.

Domaine spectral

Gamme de 60 à 670 µm correspondant au rayonnement d'objets cosmiques froids, aux alentours de 10 Kelvin : nuages du milieu interstellaire, régions de formation stellaire, enveloppes d'étoiles à la fin de leur vie.

Objectifs scientifiques

Identifier et étudier les premières phases de la formation des étoiles ainsi que les principales époques d'assemblage des galaxies.

Instruments

- PACS (pour *Photoconductor Array Camera and Spectrometer*), composée d'un photomètre imageur avec ses deux voies de matrices de bolomètres refroidis à 300 mK (la plus grande caméra de bolomètres jamais réalisée) qui observera dans les longueurs d'onde de 60 à 200 microns et d'un spectromètre constitué de deux blocs photoconducteurs dans les bandes 57 à 210 µm.
- SPIRE (pour *Spectral and Photometric Imaging Receiver*) doté d'un photomètre imageur sur trois bandes simultanées (250 µm, 350 µm et 500 µm) et d'un spectromètre FTS à moyenne résolution (200-300 µm et 300-670 µm) complémentaire pour couvrir les longueurs d'onde de 200 à 600 microns.

Ces deux instruments ne peuvent fonctionner qu'à une température proche du zéro. Aussi, un cryostat assure-t-il une température moyenne de 2°K (- 271 °C) à Herschel tandis que des cryoréfrigérateurs refroidissent les bolomètres de PACS et SPIRE à 0,3 °K (-272,85 °C). La maîtrise du froid se justifie doublement. D'abord pour refroidir les structures afin que leur température ne dépasse pas celle des objets à détecter et ensuite pour que le fonctionnement des bolomètres repose sur la mesure de variations de températures : lorsqu'ils absorbent les photons du rayonnement, leur température s'élève et donc, en utilisant une structure froide, la moindre absorption de photons pourra être détectée.

- HIFI (pour *Heterodyne Instrument for Far-Infrared*), un spectromètre à très haute résolution spectrale, utilisant les techniques plus classiques de la radio-astronomie et couvrant le domaine 170-625 µm.

Collaborations

Construit par un consortium européen de laboratoires spatiaux avec l'Agence spatiale européenne (Esa) comme maître d'ouvrage.

Rôle du CEA

Conception :

- de la caméra PACS et de ses détecteurs ;
- de l'électronique de l'instrument SPIRE.

En complément des systèmes de détection, l'Irfu a développé les fonctions électroniques indispensables à leur mise en œuvre. En effet, en raison de la réduction ou de l'absence de rayonnement parasite, l'environnement spatial permet l'accès à des mesures de très faible niveau de bruit. Le bruit propre de l'électronique embarquée doit donc demeurer inférieur au bruit de détection, ce qui nécessite,

ESA

Vue d'artiste du télescope Herschel.

en particulier, l'utilisation de détecteurs dotés de moyens de refroidissement cryogéniques et donc le développement des fonctions électroniques associées. SPIRE possède une unité d'électronique comprenant 350 voies à très bas bruit (quelques milliardièmes de volt) et à forte dynamique (plus d'un million) conçue en collaboration avec le *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) tandis que PACS utilise une unité d'électronique analogique entièrement développée par le SAp. Cette unité comprend, outre les 160 voies de traitement analogique des signaux, les fonctions de polarisation du détecteur et les fonctions associées au système cryogénique. Des voies de mesures de températures ont fait l'objet d'un développement avec l'Institut nanosciences et cryogénie (Inac). Une résolution de 10 µK à –273°C a pu être atteinte. Afin d'assurer la communication de cette unité avec le reste de l'instrument, une interface au standard ESA *SpaceWire* a été développée par le SAp sous la forme d'un module de propriété intellectuelle et a été diffusée au sein du consortium PACS.

> **Marc Sauvage** et **Christophe Cara**
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles
(CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

VLT-VISIR

Visir est une caméra-spectromètre infrarouge qui équipe le troisième télescope du VLT européen situé au Chili : des acronymes *Very Large Telescope* (VLT) et *Imager and Spectrometer for the Infra Red* (VISIR).

Domaine spectral

Infrarouge moyen avec deux fenêtres d'observation à partir du sol : longueurs d'onde entre 8 et 13 micromètres et entre 17 et 24 micromètres.

Description

- Dimensions : 1,2 m de diamètre pour 1m de hauteur.
- Poids : 1,6 tonne.
- Lancement : pas de lancement ; au sol.
- Position : caméra-spectromètre placée au foyer du télescope numéro 3 du VLT (dénommé MELIPAL) installé au nord du Chili, sur le mont Paranal, à 2 600 mètres d'altitude.
- Durée d'opération : jusqu'en 2014, date à laquelle VISIR sera dépassé par l'instrument MIRI (pour *Mid Infra Red Instrument*) du JWST (pour *James Webb Space Telescope*).

Objectifs scientifiques

Observer les poussières et les gaz tièdes (entre 50 et 500 K) de l'Univers : des comètes aux quasars avec un accent mis sur l'observation des disques circumstellaires dans lesquels se forment les planètes.

Instruments

Une caméra et un spectromètre placés dans un cryostat pour être refroidis à 15 °K (- 258 °C) pour la structure mécanique et les optiques, à 8 °K (- 265 °C) pour les détecteurs. VISIR est solidaire du télescope et tourne avec lui pour viser l'objet étudié.

ESO

Les quatre télescopes de 8 mètres de diamètre du programme VLT de l'ESO.

Cassini-CIRS

CIRS (pour C*omposite Infrared Spectrometer*) est un des instruments de la mission Cassini qui étudie Saturne, ses anneaux et son système de satellites. Cette sonde fut ainsi nommée pour rappeler que l'on doit à l'astronome Jean-Dominique Cassini (1625-1712) la découverte des quatre principaux satellites de Saturne ainsi qu'une division dans ses anneaux.

Domaine spectral
Lumière infrarouge émise par la planète Saturne, ses anneaux et ses satellites (7-9 µm, 9-17 µm, 17-1 000 µm).

Description
- Dimensions : télescope de 50,8 cm de diamètre.
- Poids : 40 kg.
- Lancement : embarqué sur la sonde Cassini-Huygens, lancée en 1997 à Cap Canaveral.
- Position : mis en orbite autour de la planète Saturne après plus de six ans et demi de voyage interplanétaire.
- Durée de vie de la mission : les 78 révolutions effectuées pendant la mission nominale (2004-2008) et les 250 révolutions au cours de la mission étendue (2010-2017).

Objectifs scientifiques
Étudier la dynamique et la structure des particules constituant les anneaux de Saturne, identifier les composants chimiques et expliquer la météorologie des atmosphères de la planète et de son satellite Titan.

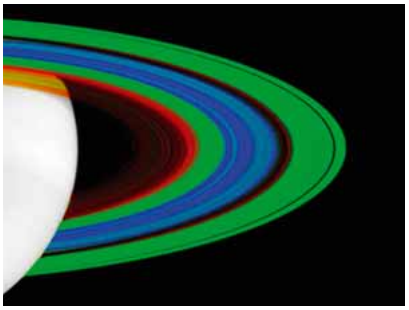
Instruments
CIRS observe à travers un spectromètre sur trois détecteurs :
- le premier, nommé FP 1 (pour plan focal) couvre le domaine submillimétrique (20-1000 µm) ;
- les deux autres, nommés FP 3 et FP 4, renferment chacun une barrette de dix détecteurs et observent dans l'infrarouge moyen, de 7 à 18 µm.

La finesse de mesure de ces instruments est dix fois meilleure que celle de son prédécesseur, le spectromètre IRIS des sondes *Voyager*, et leur sensibilité au moins mille fois plus grande.

Collaborations
États-Unis, Grande-Bretagne et France.

Rôle du CEA
Réalisation :
- de la barrette du détecteur du plan focal FP4 et de son électronique de traitement. Cette barrette se compose de 10 détecteurs photovoltaïques de très haute détectivité dans le domaine 7-9 µm. Le développement de barrettes de très haute sensibilité a constitué un réel challenge, surtout pour éliminer les défauts dans le matériau générateurs de bruit ;
- de l'électronique de traitement du signal composée de filtres très discriminants.

Les anneaux de Saturne ont été observés comme jamais auparavant : sous différents angles de vue, régulièrement, à l'échelle de quelques heures, de quelques mois ou de plusieurs années, afin de suivre les effets saisonniers. Pour la première fois, l'instrument CIRS a mesuré la température des anneaux, sur la face sud éclairée par le Soleil et sur la face nord à l'ombre. Le contraste de température permet de sonder la structure verticale du disque. Par ailleurs, il s'avère que les particules des anneaux présentent un hémisphère plus froid que l'autre, mettant indirectement en évidence qu'une fraction d'entre elles tournent lentement autour d'elles-mêmes. Une variation de l'émission thermique a également été détectée tout au long de l'anneau A, le plus éloigné de la planète. Elle s'explique par la présence de grumeaux de particules, appelés ondes d'auto-gravité, lesquels se forment à la périphérie des anneaux, là où les effets de marée sont suffisamment faibles pour que les particules arrivent à s'attirer mutuellement sous l'effet de la gravitation. Les mesures de CIRS permettent de déterminer, très précisément, la taille de ces structures, à peine hautes et larges d'une dizaine de mètres, bien en deçà de la résolution spatiale de l'instrument, de l'ordre de plusieurs milliers de kilomètres. L'année 2009 a vu l'équinoxe de Saturne, au cours de laquelle le Soleil est passé de la face sud à la face nord des anneaux, une opportunité rare d'étudier leur structure.


CIRS/JPL/NASA

La température des anneaux de Saturne déterminée par le spectromètre infrarouge CIRS : de la plus froide (en bleu) vers la plus chaude (en rouge). L'anneau bleu, le plus épais, est le plus froid, les particules se cachant plus facilement du Soleil, la source de chauffage.

> Cécile Ferrari et Louis Rodriguez
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles
(CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Collaborations
Franco-hollandaise dans le cadre d'un contrat avec l'*European Southern Observatory* (ESO).

Rôle du CEA
- Maîtrise d'œuvre du projet.
- Responsabilité scientifique.
- Conception et réalisation de l'ensemble de l'instrument, exception faite du spectromètre, réalisation hollandaise.
- Conception d'un actuateur original pour assurer le mouvement des différentes roues dans l'instrument (roue à filtre, champs de vue...) et le positionnement, très précis, des éléments optiques ; actuateur fonctionnant aussi bien à température ambiante qu'à basse température (-253 °C).

Dès le début du programme VLT, l'ESO a prévu un ambitieux plan d'instrumentation pour équiper les télescopes. Il a donc lancé un appel à la communauté astrophysique européenne pour cibler les instruments les plus pertinents. Les astrophysiciens du CEA, pionniers en Europe pour leurs observations d'imagerie dans l'infrarouge moyen à partir du sol, ont alors proposé VISIR qui fut sélectionné. L'étude et la réalisation de cet instrument a demandé 10 ans et mis en jeu de nombreux métiers dans les différents services de l'Irfu (management, contrôle projet, ingénierie des systèmes, optique, mécanique, vide, cryogénie, contrôle commande, électronique, détection...). Les instruments infrarouge devant être refroidis pour ne pas émettre de lumière infrarouge, nécessitent d'être placés dans une enceinte à vide qui les isole thermiquement de l'environnement. Trois machines frigorifiques très performantes permettent d'atteindre les basses températures requises. Il s'agit d'une matrice, de 256 x 256 pixels, fabriquée par Boeing. Après des tests intensifs réalisés au CEA/Saclay, VISIR a été livré, en 2004, et délivre depuis des images avec une finesse de détail dix fois supérieure à celle des petits télescopes spatiaux, comme le satellite Spitzer de la NASA. En revanche, sa sensibilité, limitée par le fort fond de lumière infrarouge émis par le télescope et l'atmosphère, s'avère bien moindre.

> Pierre-Olivier Lagage
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles
(CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

3. Visible

SoHo-GOLF

G.Perez/IAC

Vue d'artiste du satellite SoHo observant le Soleil.

Le satellite SoHo observe le Soleil, en continu, depuis l'espace. À son bord, l'instrument GOLF est plus particulièrement chargé de suivre les oscillations de notre étoile pour en déduire les conditions qui y règnent à l'intérieur (des acronymes *Solar and Heliospheric Observatory* et *Global Oscillations at Low Frequencies*).

Domaine spectral
Visible : doublet du Sodium Na D1 (589,6 nm) et D2 (596 nm).

Description
- Dimensions : 800 mm de long sur 325 de large et 170 de hauteur.
- Poids : 90 kg.

Lancement
GOLF est un des instruments du satellite SoHo, lancé par une fusée Centaur, en 1995, à partir du Centre spatial Kennedy (Cap Canaveral).

Position
Point de Lagrange 1, à environ 1,5 million de km de la Terre en direction du Soleil ; cette position privilégiée lui permet de regarder en permanence le Soleil, contrairement aux instruments placés sur Terre qui doivent être dupliqués et placés à différentes longitudes dans des observatoires autour de la Terre pour assurer la continuité de la prise des données.

Durée de vie de la mission : jusqu'en 2009 au moins.

Objectifs scientifiques
Mesurer les déplacements de la surface du Soleil générés par les modes d'oscillation solaires, en observant l'étoile globalement à partir de la vitesse Doppler entre le satellite et le Soleil dans la raie d'absorption du sodium. Ainsi peuvent se détecter les modes les plus pénétrants (modes radiaux, monopolaires, dipolaires...) riches d'informations sur la région nucléaire du Soleil. De plus, GOLF va tester la modélisation stellaire dans la première phase d'évolution, en y introduisant des phénomènes dynamiques absents de l'évolution stellaire classique.

Instruments
GOLF est un spectrophotomètre à dispersion résonante mesurant le décalage des raies par rapport à une référence absolue, celle donnée par la vapeur du sodium contenue dans une cellule se trouvant dans l'instrument. Les photons solaires traversant cette cellule sont absorbés et réémis puis mesurés par deux détecteurs. La cellule est placée dans un champ magnétique d'environ 5 000 Gauss et la raie réémise divisée en deux composantes grâce à l'effet Zeeman. De plus, un champ magnétique variable (± 100 Gauss) permet de faire un petit décalage supplémentaire.

Collaborations
Franco-espagnole.

Rôle du CEA
- La détection par photomultiplicateur et l'électronique associée.
- L'architecture électronique d'ensemble.
- L'électronique de chauffage de la cellule et de modulation magnétique de l'aimant.
- La réalisation de l'ordinateur de vol et du logiciel associé.
- Le support informatique de gestion des données et de communication avec le sol.
- La responsabilité scientifique de l'interprétation des données en termes de modélisation du Soleil.

GOLF a permis de progresser dans la connaissance de la structure et de la dynamique interne du Soleil et de résoudre notamment le problème des neutrinos solaires, tout cela grâce à la mesure des modes acoustiques (modes p) de bas degrés. Ces ondes se propagent dans l'ensemble du Soleil mais contiennent de moins en moins d'information sur les couches de plus en plus profondes. Pour pouvoir sonder l'intérieur du cœur nucléaire du soleil, les physiciens ont dû traquer un autre type d'ondes : les modes de gravité non mesurés avant SoHO. GOLF fut le premier à mettre en évidence la signature de certaines des propriétés de ces modes de gravité, après la détection des candidats potentiels. Il s'agit d'une avancée importante. La détection de plusieurs modes de gravité aura pour impact de mieux connaître la dynamique et la structure interne du Soleil et en particulier de son cœur. GOLF semble montrer que la vitesse de rotation de ce cœur solaire, en moyenne, s'élève de 3 à 5 fois comparé au reste de la zone radiative, un résultat inconnu jusque-là.

> Rafael-A. Garcia
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles
(CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

4. Rayons X

XMM-Newton

Ce télescope spatial (de l'acronyme *X Rays multi Mirror Mission*) observe l'Univers dans la gamme des rayons X. Pour cela, il est doté d'un système multimiroirs à incidence rasante capable de former des images à ces hautes énergies. Il s'agit du télescope en rayons X le plus sensible jamais envoyé dans l'espace.

Domaine spectral
Bande entre 0,3 et 14 KeV.

Description
- Dimensions : 10 m de longueur, 16 m d'envergure pour 4 m de diamètre.
- Poids : 3,8 tonnes.
- Lancement : en 1999, par la fusée Ariane 5, à partir de la base de Kourou.
- Position : 7 000 km de périgée et 114 000 km d'apogée.
- Durée de vie de la mission : 10 ans de vie nominale.

Objectifs scientifiques
Étudier les étoiles jeunes au cœur des nuages denses, les trous noirs et les étoiles à neutrons, la production et la circulation des éléments lourds, la formation et l'évolution des grandes structures ou encore la nature du fond diffus X.

Instruments
- Trois miroirs à incidence rasante travaillant dans le domaine des rayons X. Tous sont dotés d'un spectro-imageur CCDs (pour *Charge Coupled Devices*), fonctionnant de façon similaire aux appareils photographiques numériques. Ces instruments permettent d'acquérir les spectres de régions choisies du ciel et les images indispensables pour déterminer la température ou la nature de l'émission du gaz chaud dans les restes de supernovae ou dans les amas de galaxies.
- Un télescope optique optimisé dans le bleu et le proche ultraviolet.

Collaborations
Observatoire de l'Agence spatiale européenne (ESA) et pour la construction d'EPIC (pour *European Photon Imaging Camera*), un consortium de laboratoires venant d'Allemagne, Italie, Grande-Bretagne et France.

Rôle du CEA
- Mise au point puis étalonnage des caméras.
- Fourniture de l'électronique dédiée pour étudier en temps réel l'interaction de chaque photon X.
- Calcul d'une dizaine de paramètres pour déterminer, au sol, l'énergie du photon incident. Ce traitement, réalisé à bord, permet de transmettre au sol toute l'information scientifique utile et elle seule.

Les différences majeures dans le fonctionnement des détecteurs CCDs X et « optiques » tiennent à ce que les rayonnements visibles reçoivent un flux de lumière dont les astrophysiciens se contentent de faire une image alors que, dans la bande des rayons X, ils peuvent détecter et mesurer les photons un par un et ainsi faire, à la fois, des images et des spectres. Si, pour les rayonnements visibles, les CCDs s'utilisent comme des imageurs, ils font office de spectro-imageurs pour les rayons X. Dans une telle utilisation, les CCDs se lisent donc aussi vite que possible afin d'éviter les empilements de photons. Autrement dit, le temps de pose élémentaire est le plus court possible, l'observation proprement dite étant la somme de toutes ces poses élémentaires. Dans ces conditions, le détecteur permet de déterminer l'énergie, la date d'arrivée et la direction incidente de chaque photon incident. Les images et les spectres sont fabriqués ultérieurement à l'aide de la liste des photons reçus pendant l'observation. En conclusion, XMM-Newton est un observatoire en rayons X très sensible, en fonctionnement continu depuis bientôt dix ans, que la communauté scientifique européenne espère bien voir fonctionner jusqu'en 2020.

NASA

Vue d'artiste du satellite XMM.

> Jean-Luc Sauvageot
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

5. Rayons gamma

INTEGRAL

La lumière de haute énergie traverse facilement la matière et sa focalisation requiert des miroirs à très longue distance focale et dont l'état de surface est comparable à celui d'un plan cristallin. Il s'avère donc extrêmement difficile de former des images par réflexion ou réfraction. Pour contourner ces difficultés, les télescopes de l'observatoire spatial INTEGRAL (pour *International Gamma Ray Astrophysics Laboratory*) utilisent des « masques codés ». Il s'agit d'un dispositif qui s'inspire de la chambre noire des premiers photographes et tire avantage des possibilités de calcul contemporaines.

Description

- Dimensions : 4 m de diamètre. et 5 m de hauteur.
- Poids : 4 tonnes.
- Lancement : en 2002, depuis la base russe de Baïkonour, par une fusée Proton.
- Position : orbite excentrique 10 000/150 000 km.
- Durée de vie de la mission : 2 ans mais dimensionnée pour 5 ans et budgétisée jusqu'en 2012.

Domaine spectral

15 KeV à 10 MeV

Objectifs scientifiques

Exploration approfondie par l'imagerie, la spectrométrie et la polarimétrie, des sites célestes émettant des rayons gamma de basse énergie.

Instruments

- IBIS (pour *Imager on Board the INTEGRAL Satellite*) pour fournir des images à haute résolution angulaire et une information spectrale à moyenne résolution.
- SPI (*Spectrometer for INTEGRAL*) chargé de la spectrométrie gamma à très haute résolution.
- Deux petits instruments d'accompagnement : JEM-X (pour *Joint European Monitor*) et OMC (pour *Optical Monitor Camera*) opérant respectivement dans la bande des rayons X et dans le domaine visible.

Collaborations

Observatoire de l'Agence spatiale européenne (Esa) et, pour la construction des instruments, un consortium de laboratoires situés en Allemagne, au Danemark, en Espagne, en France, en Irlande, en Italie, en Norvège, en Pologne et en Russie.

Rôle du CEA

- Conception et coresponsabilité de l'instrument IBIS.

ESA

Vue d'artiste d'INTEGRAL.

- Simulation du dispositif expérimental et calcul de la réponse spectrale de l'instrument IBIS.
- Étude, développement et maîtrise d'œuvre de la caméra ISGRI (pour *INTEGRAL Soft Gamma-Ray Imager*) de nouvelle génération, le plan supérieur du télescope IBIS.
- Développement et maintenance des logiciels d'analyse scientifique d'IBIS et ISGRI.
- Fourniture de l'électronique digitale de proximité du spectromètre SPI.
- Responsabilité de l'étalonnage de SPI auprès de l'accélérateur tamdem installé sur le centre CEA de Bruyères-le-Châtel.
- Conception de l'étalonnage du satellite INTEGRAL, fourniture d'un générateur X et de sources radioactives.

Notre Galaxie est-elle une Voie lactée à proprement parler, autrement dit son émission est-elle due à des nébuleuses ou à des étoiles ? Depuis Galilée, on sait que les étoiles dominent l'émission visible. En revanche, il a fallu attendre INTEGRAL pour savoir ce qu'il en est dans le domaine des photons gamma de basse énergie. La réponse dépend de l'énergie des photons. En dessous de 200 keV, IBIS a montré que l'émission de notre Galaxie s'avère totalement dominée par celle des systèmes binaires accrétants. Ceux-ci sont formés d'un trou noir ou d'une étoile à neutrons qui arrache de la matière à son compagnon. C'est l'émission de cette matière, portée à 100 millions de degrés, qu'IBIS a détectée. S'il y a une émission interstellaire, elle est beaucoup plus faible dans ce domaine d'énergie. En revanche, les systèmes binaires émettent peu au-delà de 200 keV et c'est probablement l'émission de décroissance du positronium, pseudo-atome formé d'un électron et d'un positon, dans le milieu interstellaire, qui domine celle de la Galaxie. C'est le cas à 511 keV, où les performances spectrométriques de SPI ont permis de mettre en évidence la morphologie de l'émission. Celle-ci se compose d'un sphéroïde de 8° d'extension trônant au centre de notre Galaxie et d'un disque de luminosité comparable. Il semble que l'on trouve plus d'émission à 511 keV du côté où l'on trouve aussi plus de systèmes binaires X. Cette différence est-elle réelle ? Y-a-t-il un lien de cause à effet ou ces deux constatations résultent-elles simplement d'une asymétrie plus générale de notre Galaxie ? Telles sont quelques-unes des questions auxquelles INTEGRAL doit encore apporter ses lumières dans les années à venir.

> François Lebrun
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche (CNRS-Université de Paris7-CEA-Observatoire de Paris)
Laboratoire astroparticules et cosmologie (CNRS-Université de Paris 7- CEA)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Fermi Gamma-Ray Space Telescope

Capable de capter un rayonnement de très haute énergie, le télescope Fermi est dédié à l'étude de l'accélération des particules. Il doit son nom à Enrico Fermi (1901-1954), physicien italien qui a proposé un mécanisme d'accélération des particules par onde de choc, à l'œuvre dans de nombreux astres.

Domaine spectral

Bande d'énergie comprise entre 20 MeV et 300 GeV.

Description

- Dimensions : 2 m sur 2 m.
- Poids : 2,8 tonnes.
- Lancement : en 2008, du Centre spatial Kennedy (Cap Canaveral).
- Position : 565 km d'altitude.
- Durée de vie de la mission : 5 ans, voire 5 ans de plus.

Objectifs scientifiques

Étudier l'accélération de particules auprès :

- des trous noirs d'origine stellaire (micro-quasars) ;
- des trous noirs géants tapis au centre des galaxies (quasars) ;
- des étoiles à neutrons (pulsars) et de leurs vents de particules ultra-relativistes ;
- des vestiges d'explosion de supernovae dont l'onde de choc accélère probablement les rayons cosmiques ;
- des explosions d'hypernovae à l'origine des sursauts γ.

Étudier les nuages interstellaires irradiés par les rayons cosmiques et cachant du gaz noir invisible.

Instruments

- Un télescope sensible aux rayons γ (20 MeV à 300 GeV) constitué d'un trajectographe en pistes de silicium interlacées de feuilles de tungstène servant à convertir les rayons γ en paires d'électron-positon, puis à suivre leurs traces pour reconstituer la direction des rayons γ incidents. Sous le trajectographe se trouve un ensemble de cristaux scintillants en iodure de césium où les paires déposent leur énergie, ce qui permet de remonter à celle du rayon γ d'origine. L'ensemble du dispositif est entouré de plaques de scintillateurs plastiques pour repérer le passage des nombreuses particules chargées qui frappent le télescope, et sont ainsi rejetées, pour ne garder que les rares rayons γ. L'ensemble présente un champ de vue exceptionnel (2 sr), capable de couvrir tout le ciel toutes les 3 heures.
- Un détecteur de sursauts γ fonctionnant de 8 keV à 30 MeV.

Collaborations

États-Unis, France, Italie, Allemagne, Japon, Suède.

NASA

L'observatoire Fermi dans sa coiffe, avant d'être installé dans la fusée qui l'a mis en orbite.

Rôle du CEA

Responsabilité totale ou partielle d'éléments fondamentaux de l'analyse des données : catalogue des sources, modèle d'émission de la Voie lactée.

Les performances instrumentales de GLAST-Fermi sont à la hauteur des espérances. La carte du ciel obtenue après seulement 3 mois d'observations révèle déjà plus de détails que les 9 années d'observations du précédent satellite EGRET (pour *Energetic Gamma Ray Experiment Telescope*). Des centaines de sources ont été détectées et le piqué des images a été amélioré d'un facteur 2. Le gain en sensibilité montre un ciel très animé, rythmé par les clignotements rapides des pulsars qui tournent sur eux-mêmes des dizaines ou centaines de fois par seconde, par les fréquentes éruptions des quasars au fil des heures et des jours, et par la lente périodicité des systèmes binaires sur les mois que prend le trou noir ou pulsar pour tourner autour de son étoile compagnon. Fermi a déjà découvert les pulsations γ de plusieurs dizaines de pulsars dont certains étaient inconnus à d'autres longueurs d'onde, ainsi que des dizaines de nouveaux quasars non actifs du temps d'EGRET. Le plus lointain, situé à presque 12 milliards d'années-lumière, illustre la grande portée du télescope qui a également détecté (jusqu'à 10 GeV) le sursaut γ le plus puissant jamais vu, à 12,4 milliards d'années-lumière.

> Isabelle Grenier
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles
(CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

HESS

HESS Colaboration

Les quatre télescopes de 12 m de diamètre de la phase 1 de HESS, installés en Namibie.

HESS (pour *High Energy Stereoscopic System*) est un ensemble de télescopes terrestres capables de détecter le rayonnement gamma de très haute énergie. Il doit son nom au physicien Victor Hess (1883-1964) qui découvrit, en 1912, que la Terre était bombardée, en permanence, par un flux de particules cosmiques de haute énergie.

Domaine spectral

Pour HESS : rayonnement gamma de très haute énergie (100 GeV - 50 TeV) observable depuis le sol par son interaction avec la haute atmosphère qui produit un très faible éclair de lumière bleue, appelé aussi lumière Cherenkov. Pour HESS 2 : (20 GeV – 50 TeV).

Description

- Dimensions : miroirs de 12 mètres de diamètre pour HESS et de 28 mètres de diamètre pour HESS 2.
- Poids : télescopes de 50 tonnes, caméra d'une tonne (HESS).
- Lancement : pas de lancement.
- Position : au sol, sur le plateau de Khomas (Namibie), près du Gamsberg, à une altitude de 1 800 mètres.
- Durée de vie de la mission : au moins 5 ans.

Objectifs scientifiques

Étude des processus d'accélération régnant dans des objets aussi variés que les vestiges de supernovae ou les noyaux actifs de galaxies. Recherche de processus exotiques de production de photons tels que les annihilations de matière noire sous forme de particules. Pour HESS 2, il s'agira d'accéder à des énergies de quelques dizaines de GeV.

Instruments

- Pour HESS : 4 télescopes de 12 mètres de diamètre répartis aux coins d'un carré de 120 mètres de côté. Pour HESS 2, un télescope de 28 mètres de diamètre au centre des quatre précédents.
- Pour HESS : 4 miroirs segmentés (380 petits miroirs sphériques de 60 cm de diamètre) de 2 mètres de diamètre. Pour HESS 2 : 600 miroirs hexagonaux de 1 m^2.
- Pour HESS : 4 caméras (1,6 m de diamètre, 1,5 m de longueur et d'un poids de 800 kg), chacune dotée de 960 photomultiplicateurs (dispositifs sensibles à la lumière bleue et dont le temps de réponse est extrêmement rapide, de l'ordre de la nanoseconde), couvrant un champ de vue de 5°. Pour HESS 2 : une caméra de 3 tonnes, dotée de 2 048 photomultiplicateurs, couvrant un champ de vue de 3°.

Collaborations

Environ 150 membres majoritairement allemands et français.

Rôle du CEA

- Électronique du circuit intégré spécifique nommé ARSO (pour *Analogue Ring Sampler*) initialement développé pour l'expérience Antarès. Seuls quelques laboratoires au monde sont capables de travailler sur les mémoires analogiques rapides. Pour les besoins du futur télescope HESS 2, l'ARSO sera remplacé par SAM (pour *Swift Analogue Memory*) fonctionnant sur le même principe mais avec une capacité de lecture de l'ordre de 105 événements/seconde.
- Responsabilité de la conception et de la construction de la carte de déclenchement du niveau deux de HESS 2. Cette carte de déclenchement est un composant crucial pour obtenir des photons de moins de 50 GeV.

Les photons de plusieurs centaines de GeV détectés par HESS proviennent généralement de sources de rayonnement non-thermique comme les nébuleuses de pulsars, les restes de supernovae, les noyaux actifs de galaxies. Leur émission résulte de collisions d'électrons et de positrons rapides sur des photons ambiants (effet Compton « inverse ») ou de la désintégration de pions neutres produits dans des collisions de protons. Le spectre en énergie de ces deux processus atteint son maximum entre quelques GeV et quelques TeV, c'est-à-dire dans les domaines d'énergie couverts par le satellite Fermi et par HESS. De l'étude combinée de leurs données viendra, peut-être, la preuve que les restes de supernovae sont des accélérateurs de protons et donc des sources de rayons cosmiques. Grâce à sa résolution angulaire, HESS fut le premier à cartographier, en détail, des sources de photons de très haute énergie du plan galactique. La plupart de ces sources sont des restes de supernovae ou des nébuleuses de pulsars. HESS a également découvert de nouvelles classes d'objets cosmiques émetteurs de rayons gamma comme les étoiles binaires LS5039 et PSR B1259-63 ou encore l'amas d'étoiles jeunes Westerlund 2. D'autres sources plus exotiques de photons de très haute énergie sont également recherchées, dont l'annihilation d'hypothétiques particules de matière noire, prédites par les extensions du Modèle standard de la physique des particules. Prévue pour 2010, l'expérience HESS 2 devrait permettre d'accéder à des énergies de quelques dizaines de GeV. Aux quatre premiers télescopes installés au cours de la première phase, démarrée en 2003, s'en ajoutera un cinquième, doté d'un miroir de 28 mètres de diamètre et d'une caméra de 2 000 photomultiplicateurs.

> Jean-Francois Glicenstein
Service de physique des particules (SPP)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

EDELWEISS

De l'acronyme Expérience pour détecter, en site souterrain, les *Weakly Interacting Massive Particles* (WIMPS).

Ni sur terre ni dans l'espace, cet instrument destiné à identifier la nature de la **matière noire** (25 % de la masse de l'Univers) a été installé à 1 700 m sous terre, dans le hall du Laboratoire souterrain de Modane (LSM), situé le long du tunnel routier du Fréjus. La raison en est que, selon l'hypothèse la plus consensuelle, la matière noire se composerait de particules nommées **Wimps**. Or, les théories de supersymétrie (SUSY), en physique subatomique, prédisent l'existence d'un nouveau type de particules, les **neutralinos** qui coïncideraient avec les Wimps. Ces particules fossiles du **big bang**, évanescentes, se concentreraient dans les galaxies en formant un **halo**, notamment autour de notre **Voie lactée** où « baigne » le système solaire et donc la Terre. Si ces particules s'avèrent si difficiles à détecter, c'est en raison de leur très faible interaction avec la matière ordinaire et donc, *a fortiori*, avec les détecteurs. D'où la nécessité de protéger ces détecteurs des parasites, notamment le **rayonnement cosmique** et la **radioactivité naturelle** (celle émanant, entre autres, du corps humain, des roches, des matériaux...). Ce qui explique l'installation souterraine de l'expérience, l'utilisation de matériaux d'une pureté radioactive extrême et le blindage multiple des détecteurs (80 tonnes de plomb et polyéthylène). Grâce à son cryostat unique au monde par son volume (100 litres) et ses détecteurs ultra-sensibles (des **bolomètres** en **germanium** fonctionnant à 20 mK), les physiciens peuvent mesurer la très faible élévation de la température (à peine un millionième de degré) produite par les **chocs** infimes laissés par les WIMPS. Cette expérience a nécessité la coopération de neuf laboratoires, dont six français, deux allemands et un russe.

> Gilles Gerbier
Service de physique des particules (SPP)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

CEA

Le cryostat d'Edelweiss ouvert pendant le montage du détecteur.

Proto-Jupiter immergé dans son disque protoplanétaire. La protoplanète excite un sillage spiral à un bras, et creuse un sillon autour de son orbite. Après l'instrumentation et l'observation, la simulation est la troisième voie de recherche en astrophysique. L'objectif du programme Coast est de modéliser des phénomènes astrophysiques complexes, afin de confirmer les théories actuelles sur la physique des astres et de préparer les futures observations astronomiques. Les principales études qui ont bénéficié de ce programme sont la cosmologie, la physique stellaire, l'étude des disques protoplanétaires et celle du milieu interstellaire. Disques protoplanétaires : les codes Fargo (2D) et Jupiter (3D) décrivent, sur une grille, l'évolution du gaz constituant la nébuleuse protoplanétaire.

F.Masset/CEA

II. DES OUTILS POUR SONDER L'UNIVERS

Comment expliquer la répartition des étoiles selon leur masse ? Comment meurent les galaxies ? Quelle est l'origine de l'accélération de l'expansion de l'Univers ? Pour tenter de résoudre ces questions, les astrophysiciens développent une nouvelle génération de télescopes révolutionnaires capables d'observer plus loin, plus précisément et de façon plus large que leurs prédécesseurs. Ces télescopes, installés au sol ou dans l'espace, collecteront la lumière qui sera analysée, dans ses plus infimes détails, par des instruments à la pointe de la technologie de détection. Capables de produire des images d'une grande finesse, tout en développant de remarquables capacités spectrométriques, ces instruments très sophistiqués, appelés « spectro-imageurs », figurent parmi les domaines d'excellence du CEA.

Leur mission ? Recueillir les informations émises par les sources cosmiques afin de les convertir sous forme de signaux numériques qui feront l'objet de différentes méthodes de traitement de l'information. Celles-ci connaissent aujourd'hui des développements véritablement spectaculaires. Ensuite, il appartiendra aux astrophysiciens d'en analyser les résultats. Pour y parvenir, ces chercheurs recourent à des simulations numériques de l'Univers, et de ses objets, réalisées par des supercalculateurs massivement parallèles.

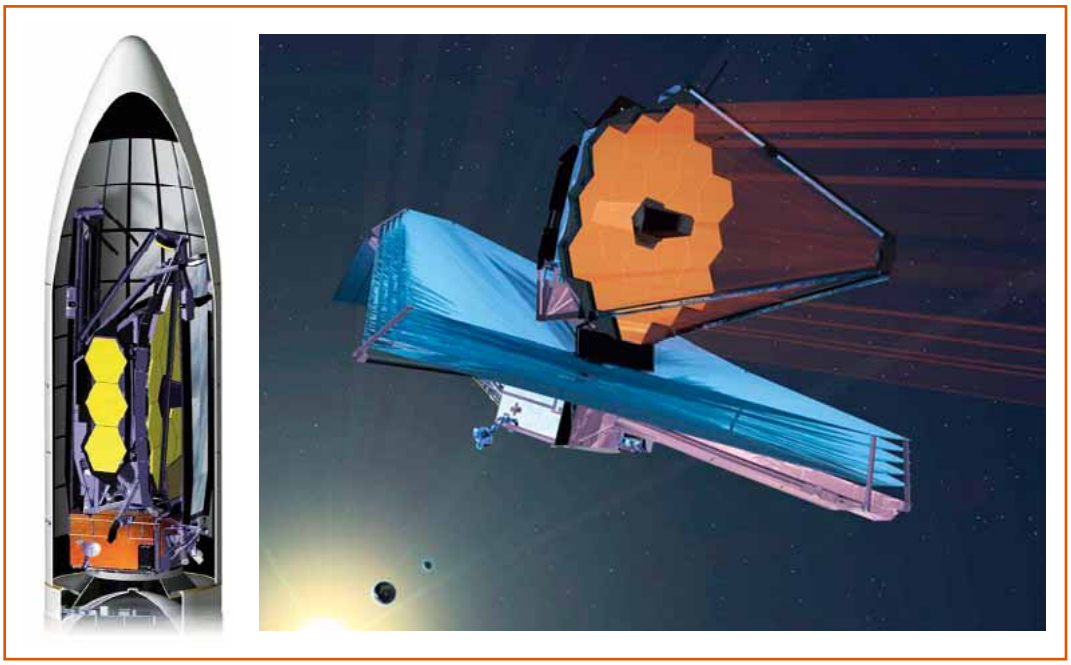
Ainsi, l'ancestral dyptique scientifique « théorie/observation » s'est-il enrichi d'un nouvel outil – la simulation numérique – venu faire lien entre des modèles théoriques toujours plus complexes et l'indispensable observation. Des résultats de ces travaux, les chercheurs attendent la confirmation, ou l'invalidation, de leurs connaissances actuelles sur l'Univers.

Les **télescopes** du futur

Même si les astrophysiciens ont complètement renouvelé notre connaissance du système solaire, même s'ils ont décelé quelque 400 exoplanètes, même si l'expansion de l'Univers est bien établie par l'observation, même si les télescopes parviennent à scruter presque jusqu'aux confins de l'Univers, là où naquirent les premières étoiles et galaxies...
Il n'empêche que **de grandes questions demeurent et que de nouvelles se posent comme celle de l'origine de la ré-accélération actuelle de l'expansion de l'Univers qui reste un grand mystère**. D'où la naissance d'une nouvelle génération de télescopes capables d'observer le cosmos plus loin, plus précisément, de façon plus large.

1. Voir plus loin

JWST : regard sur un passé de treize milliards d'années



NASA

Vue d'artiste du JWST replié dans la coiffe de la fusée Ariane 5 (image de gauche) et déployé dans l'espace (image de droite) où l'on peut voir, outre le miroir primaire (en doré), les écrans thermiques (en bleu) qui empêchent les rayons du Soleil de venir chauffer le télescope.

Aujourd'hui encore, le télescope spatial Hubble (HST) demeure un des plus fabuleux observatoires à l'origine d'un nombre impressionnant de découvertes. Néanmoins, avec un télescope dont le diamètre n'excède pas 2,4 mètres, il ne peut détecter la faible lueur reçue des objets cosmiques les plus lointains. Y parvenir nécessiterait la conception et la construction d'un télescope d'une surface collectrice plus importante, capable d'observer la **lumière infrarouge** (**IR**) – la **lumière visible** émise par un objet très lointain dans un Univers en expansion étant décalée vers l'infrarouge pour l'observateur. Ainsi naquit l'idée du télescope spatial *James Webb* (JWST)[1] pour succéder au HST. Grâce à son miroir de 6,5 mètres de diamètre, le nouveau télescope pourra observer l'Univers tel qu'il existait il y a 13 milliards d'années, époque de la formation des premières **étoiles**.
Il s'agit d'un programme de la **NASA** avec des participations européenne et canadienne. En partenariat avec le **Cnes**, le CEA, à travers le Service d'astrophysique (SAp) de l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu), assumera deux responsabilités importantes : d'abord, le pilotage de la contribution française à MIRI (pour *Mid Infrared Instrument*), l'un des quatre instruments embarqués par JWST et dédié à l'observation du **rayonnement**

(1) Ainsi nommé en hommage au second admistrateur de la NASA, James E. Webb.

infrarouge cosmique dans la gamme de longueurs d'**onde** 5-28 micromètres ; ensuite, la responsabilité du futur Centre d'expertise français consacré à l'analyse des données recueillies par MIRI.

Le JWST sera lancé en 2014 par une fusée Ariane 5, seule capable de mettre en orbite un tel géant. Le volume de la coiffe de la fusée Ariane n'étant pas suffisant pour accueillir le nouveau télescope, celui-ci sera embarqué replié et ne sera déployé qu'une fois dans l'espace. Grâce à d'importants développements technologiques, l'ensemble du dispositif a pu être considérablement allégé. Ainsi, malgré un diamètre presque trois fois supérieur à celui de son prédécesseur HST, le JWST n'aura qu'une masse de 6,5 tonnes, soit deux fois moins que son prédécesseur. Restait aux ingénieurs à résoudre une autre contrainte majeure. Dédié à la détection du rayonnement cosmique infrarouge, le JWST fonctionnera à des températures de l'ordre de -220 °C afin d'éviter que son émission de lumière ne puisse gêner les observations du cosmos. D'où la décision de placer le JWST au **point de Lagrange** L2, situé à 1,5 millions de kilomètres de la Terre (figure 1) contrairement au positionnement du HST sur une orbite basse à seulement 600 km de la Terre environ. Vu la distance, il ne sera plus question d'aller réparer le télescope en cas de problème !

Trois instruments principaux trouveront leur place au foyer du JWST pour capter la lumière concentrée par le télescope puis la transformer en signal digital envoyé vers la Terre :

- NIRCAM (pour *Near InfraRed Camera*), une caméra pour l'infrarouge proche (1 à 5 micromètres), conçue et réalisée aux États-Unis ;
- NIRSPEC (pour *Near InfraRed Spectrometer*), un **spectromètre** également dédié à l'infrarouge proche, conçu et réalisé par l'industrie européenne sous la responsabilité et avec le financement de l'**Agence spatiale européenne (ESA)** ;
- MIRI (pour *Mid Infrared Instrument*), un spectro-imageur pour l'infrarouge moyen (5 à 27 micromètres), conçu et réalisé grâce à une collaboration réunissant, pour moitié, les États-Unis (**Jet Propulsion Laboratory/NASA**) et, pour l'autre, un consortium de laboratoires spatiaux européens appartenant à dix pays (par ordre d'importance décroissante des contributions financières : Royaume-Uni, France, Belgique, Pays-Bas, Allemagne, Espagne, Suisse, Suède, Danemark, Irlande) conduits par l'**Observatoire royal d'Edimbourg** et financés par les agences nationales.

Il faut savoir qu'initialement, le projet JWST ne prévoyait aucun instrument dédié à l'observation dans l'infrarouge moyen. À la fin des années 1990, seuls quelques rares astrophysiciens américains et européens en défendaient la présence à bord du futur télescope spatial. Parmi les précurseurs, figuraient notamment des astrophysiciens du CEA, conscients des potentialités de ce type d'instrument et déjà fortement impliqués dans l'observation du rayonnement infrarouge moyen – par exemple, avec la caméra ISOCAM envoyée dans l'espace en 1995 ou avec l'instrument VISIR (pour *Very Large Telescope Imager and Spectrometer in Infrared*) de l'**Observatoire européen austral** (**ESO**) au Chili.

NASA

Maquette, à l'échelle 1, du JWST.

Ces circonstances conduiront le SAp à prendre la responsabilité scientifique et technique de l'imageur de MIRI[2]. Outre l'Irfu, trois autres laboratoires français sont impliqués dans ce projet, à savoir le **Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique** (**Lesia**) de l'**Observatoire de Paris Meudon**, l'Institut d'astrophysique spatiale (IAS), à Orsay, et le **Laboratoire d'astrophysique de Marseille** (**Lam**). Quant au Cnes, également partenaire du CEA, il finance le projet à hauteur de 50 % (main-d'œuvre incluse).

(2) Outre le SAp, d'autres services de l'Irfu participent au projet : le Service d'électronique des détecteurs et d'informatique (Sedi), le service d'ingénierie des systèmes (Sis), le Service des accélérateurs, de cryogénie et de magnétisme (Sacm).

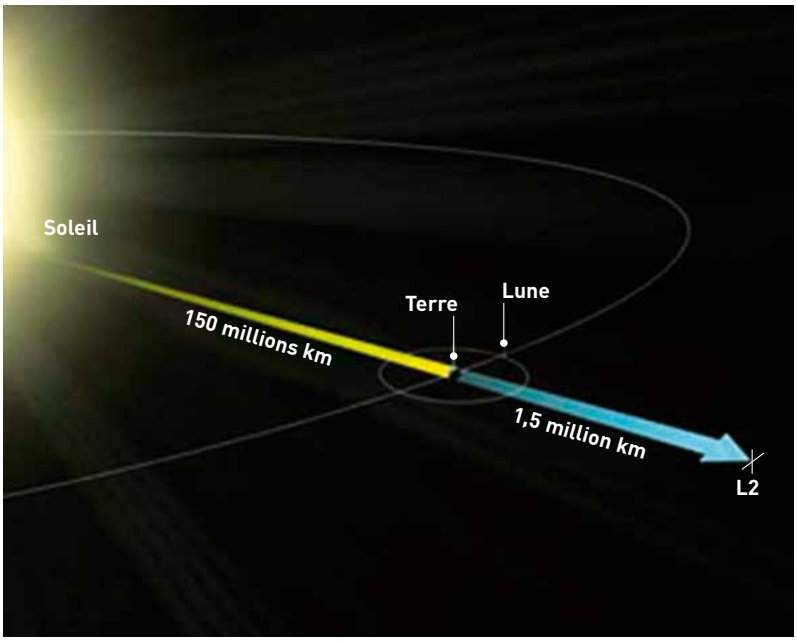


Figure 1.
Schéma indiquant la position du point L2 où sera placé le JWST.

L. Godart/CEA

La caméra du *Mid Infrared Imager* (MIRIM), destinée au télescope JWST, en train d'être inspectée, sous éclairage ultraviolet, pour vérifier qu'il n'y a pas eu de contamination particulaire.

Une fois en service, le JWST entrera dans la gamme des télescopes infrarouge de deuxième génération. Avec une sensibilité et une acuité angulaire 100 fois supérieure à celle de ses prédécesseurs, ce nouvel instrument va permettre des avancées notables dans différents domaines de l'astrophysique comme l'assemblage des **galaxies**, les premières phases de formation des étoiles ou encore la recherche d'exoplanètes. Concernant ce domaine particulier, un mode d'observation dit coronographique a été introduit dans l'imageur de MIRI. Il s'agit d'une méthode permettant d'« éteindre » une étoile pour sonder ses alentours proches sans être « ébloui » et de pouvoir ainsi rechercher d'éventuelles **planètes**, des « compagnons », des disques de poussière… Ce mode d'observation coronographique a nécessité la fabrication de composants optiques spécifiques jusqu'alors introuvables dans l'industrie. Le Lesia les a conçus et l'Institut rayonnement matière (Iramis) du CEA les a réalisés.

Où en est le projet aujourd'hui ? D'un point de vue technique, les différents modèles de l'imageur de MIRI indispensables à la qualification spatiale de l'instrument sont d'ores et déjà réalisés. Le modèle qui volera se trouve actuellement en phase de tests sur le centre du CEA de Saclay. À la fin de cette opération, prévue en décembre 2009, l'instrument sera livré aux ingénieurs britanniques qui opéreront son assemblage au spectromètre avant d'envoyer le tout à la NASA. Celle-ci procédera à l'intégration du dispositif au sein du JWST en 2011.

La réalisation de l'imageur de MIRI confère désormais aux ingénieurs et aux chercheurs du CEA une excellente connaissance de l'appareil. Elle leur garantit également le temps d'observation nécessaire à la conduite de nouveaux programmes d'observation encore plus ambitieux – autant d'atouts qui vont permettre au SAp de figurer longtemps encore aux avant-postes de la recherche en astrophysique. Cette expertise acquise par le CEA lors de la construction de l'instrument, lors des tests réalisés en laboratoire ou dans l'espace, bénéficiera à l'ensemble de la communauté européenne des astrophysiciens, grâce à la fondation d'un Centre d'expertise implanté à Saclay. Autre avantage du projet, celui de conserver la compétence scientifique et technique du CEA dans le domaine du rayonnement de l'infrarouge moyen, toujours très porteur pour l'astronomie. En effet, la suite se prépare déjà avec, notamment, les études de l'instrument METIS (pour *Mid-infrared E-Elt Imager and Spectrograph*) pour le télescope E-ELT (pour *European Extremely Large Telescope*) : un nouveau géant de 42 mètres de diamètre que l'ESO étudie aujourd'hui en détail (voir *ELT/METIS, un géant de 42 mètres*, p. 110).

> **Pierre-Olivier Lagage**
et **Jean-Louis Auguères**
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS).
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Les spécificités du spatial : apprentissage d'un savoir-faire

La réalisation d'engins spatiaux est un domaine de la technique relativement neuf à l'échelle de la science astronomique. En France, les premières expériences embarquées sur des fusées sondes pour récolter quelques minutes d'observation au-dessus de l'atmosphère datent d'à peine un demi-siècle. À cette époque de pionniers, la méthode des essais et des erreurs pouvait répondre aux attentes de la communauté scientifique. Mais, avec l'arrivée des satellites, il a fallu commencer à mettre en place un référentiel de travail commun visant à optimiser les chances de succès et à assurer un retour d'expérience permettant de minimiser les risques des projets futurs.

Ce référentiel de travail permet, *via* des normes d'ingénierie, de qualité et de gestion de projets, de prendre en compte, dès les phases préliminaires de conception, les contraintes spécifiques du spatial. On pense, bien sûr, d'abord aux contraintes techniques fortes : les instruments spatiaux font souvent appel à des technologies en limite de faisabilité utilisées dans des domaines extrêmes de leurs applications. Mais les exigences liées aux programmes spatiaux dépassent largement les besoins fonctionnels en opération. Ainsi les contraintes environnementales spécifiques, vibrations de la fusée au lancement, ultra-vide, **radiations**, impossibilité d'intervention en cas de pannes, nécessitent-elles une approche qualité particulièrement rigoureuse.

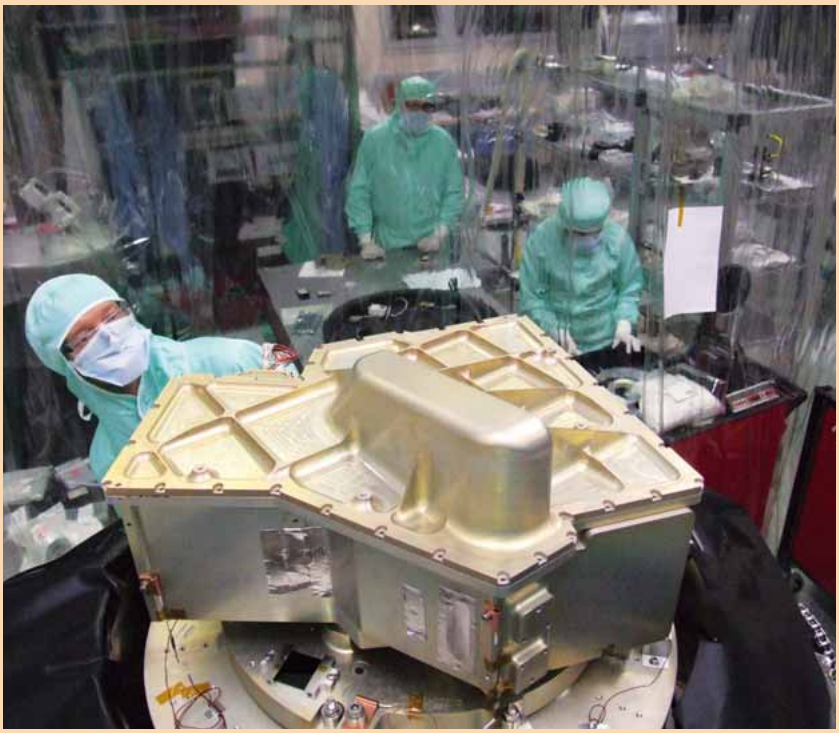
Prenons le cas du télescope spatial JWST pour lequel le CEA/Irfu développe la caméra infrarouge MIRIM (pour *Mid Infrared Imager*) qui permettra de sonder les premières étoiles de l'Univers. Ce projet aura nécessité plusieurs milliards de dollars et mobilisé pas moins de 20 ans d'efforts, de part et d'autre de l'Atlantique, entre les premiers dessins datant du milieu des années 90 et le lancement prévu en 2014. Des composants à l'instrument complet, chaque système subit une campagne de qualification pour démontrer la fiabilité et les performances du concept choisi. Par exemple, avant la réalisation du modèle de vol, la caméra MIRIM aura connu, en cinq ans, quatre modèles d'instrument complet, destinés à vérifier toutes ses performances en conditions opérationnelles, notamment sa tenue au lancement avec des tests de vibration, ou aux températures extrêmes avec des tests cryogéniques en enceinte refroidie à l'**hélium** liquide (4 K). Pareillement, pour les caméras PACS (pour *Photoconductor Array Camera and Spectrometer*) et SPIRE (pour *Spectral and Photometric Imaging Receiver*), destinées au télescope spatial Herschel, il aura fallu 2 500 heures de travail pour contrôler les 65 000 composants électroniques, 900 pièces mécaniques et 50 cartes électroniques.

L. Godart/CEA

Banc de test cryogénique de MIRIM au SAp. Les bancs de tests et campagnes d'essais peuvent atteindre des niveaux de complexité et de coût avoisinant, dans certains, cas, ceux de l'instrument.

Ainsi, au fur et à mesure, les concepts s'affinent, les procédures s'améliorent et les anomalies (non-conformité ou erreurs) diminuent jusqu'au niveau de risque jugé acceptable pour la réussite du projet. Dans un environnement politique et international souvent complexe, la gestion des programmes spatiaux demande de savoir doser la gestion des risques face aux contraintes de coût et de planning. Supprimer une campagne de test laisse parfois penser que l'on gagne de précieuses journées de travail, mais les risques associés peuvent se révéler autrement plus coûteux et catastrophiques, comme l'a montré l'exemple d'Hubble. Une analyse précise des chemins de criticité est nécessaire pour assurer le bon déroulement de programmes longs, incertains et risqués.

Certaines des contraintes présentées dans cet article se retrouvent dans d'autres domaines de l'instrumentation scientifique. Néanmoins, la grande spécificité des programmes spatiaux, c'est la simultanéité, au sein d'un projet, de toutes ces contraintes particulières, et des méthodes adoptées pour les gérer.

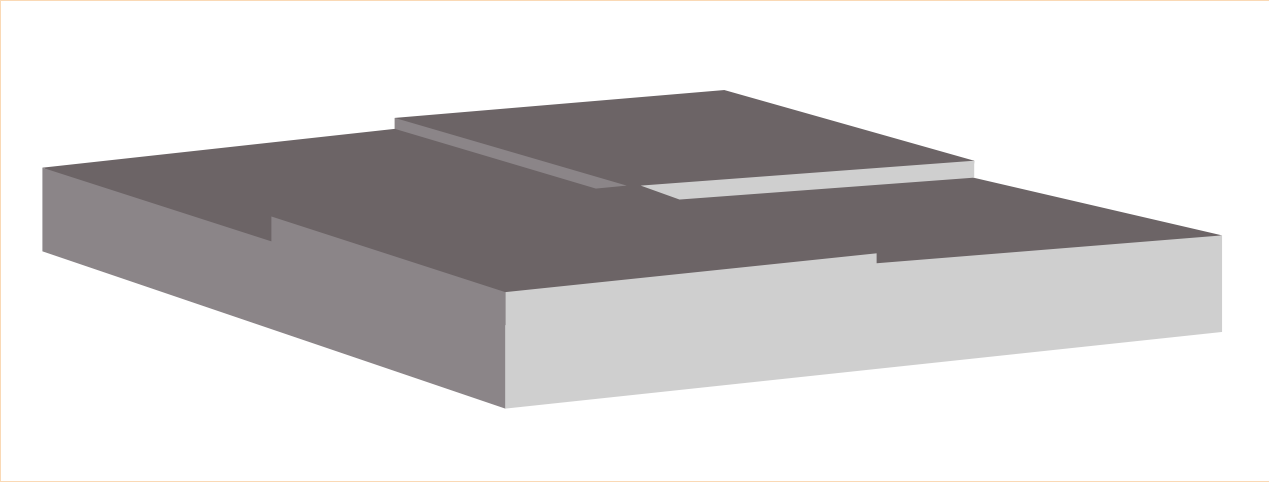


L. Godart/CEA

Modèle de vol de l'instrument MIRIM en cours d'intégration dans l'enceinte cryogénique de test, au SAp. Les contraintes de propreté des instruments spatiaux nécessitent de travailler en environnement contrôlé, ici en classe 100 (moins de 100 particules de taille supérieure à 0,5 µm par pied cube).

> **Jérôme Amiaux, Christophe Cara, Jean Fontignie** et **Yvon Rio**
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles (CEA-Université de Paris 7-CNRS).
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

La réalisation d'un masque coronographique



CEA

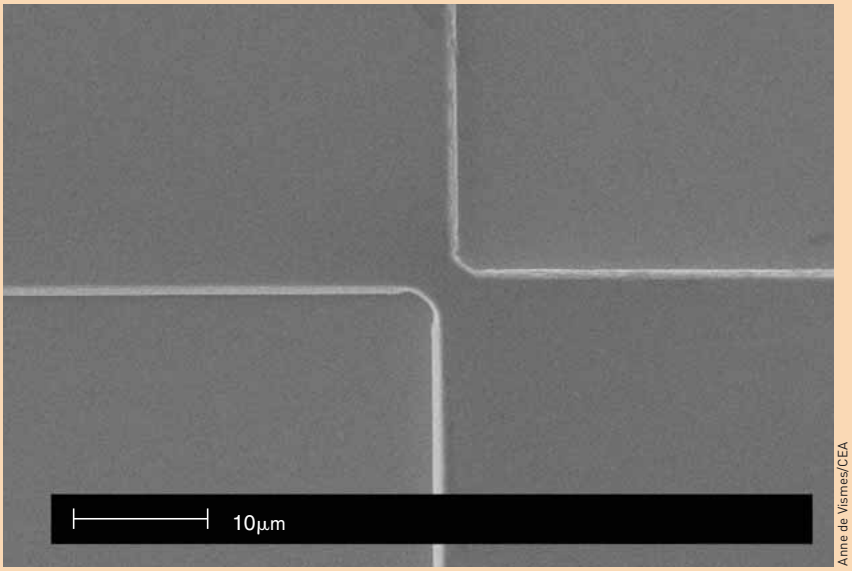
Figure 1.
Schéma du masque coronographique en germanium monocristallin (la hauteur de marche n'étant pas à l'échelle).

Inventée par Bernard Lyot (1897-1952) au début des années 30, la coronographie consiste à reproduire une éclipse totale pour observer la **couronne solaire** sans qu'elle se trouve noyée par la luminosité de l'astre. Le principe consiste à placer une pastille opaque sur l'image du **Soleil** formée par une lunette astronomique, afin d'occulter le disque solaire et de ne laisser voir ainsi que la lumière de la couronne solaire. Aujourd'hui, la coronographie est utilisée pour l'observation d'autres **étoiles** que le Soleil et il existe une alternative aux pastilles de Lyot pour réaliser ces observations : ce sont les tout nouveaux masques de phase à quatre quadrants (4QPM), qui permettent de meilleures performances. Leur réalisation consiste en une lamelle de géométrie quasiment parfaite, présentant deux quadrants de différente épaisseur par rapport aux deux autres, d'une demi-longueur d'onde optique dans le germanium à la fréquence d'observation (figure 1).

L'instrument MIRI (pour *Mid Infrared Instrument*), destiné au futur télescope JWST (pour *James Webb Space Telescope*), utilisera ce principe pour cibler trois longueurs d'**onde** d'observation dans l'infrarouge – d'où le développement de masques de type 4QPM en **germanium**, un matériau qui présente l'avantage de devenir transparent dans ce domaine d'observation. Dans le processus de fabrication, le **Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique** (**Lesia**) a fourni des parallélépipèdes, dans un monocristal de germanium, présentant des faces parallèles et planes. L'obtention de la différence de marche dans le germanium doit tout à la grande précision des outils de microfabrication de la salle blanche du Service de physique de l'état condensé (Spec). Deux techniques furent utilisées : la lithographie optique pour la définition des quadrants à protéger et la gravure ionique réactive pour la gravure des quadrants plus fins. Mais pour les chercheurs, la plus grande difficulté de fabrication des masques fut de parvenir à la précision requise :

- une différence de marche établie entre 0,8 **µm** et 2 µm en fonction de la longueur d'onde de travail ;
- une erreur de marche inférieure à 0,5 % ;
- une excellente homogénéité malgré une surface totale dépassant le cm^2 ;
- une rugosité de surface maintenue inférieure à 30 nanomètres sur l'ensemble du composant.

Il a fallu réaliser une soixantaine de prototypes et passer par toute une série d'étapes (dépôt de résines, gravure réactive, nettoyage, contrôle de la hauteur de marche etc) pour obtenir enfin les trois masques définitifs qui équiperont MIRI (figure 2).



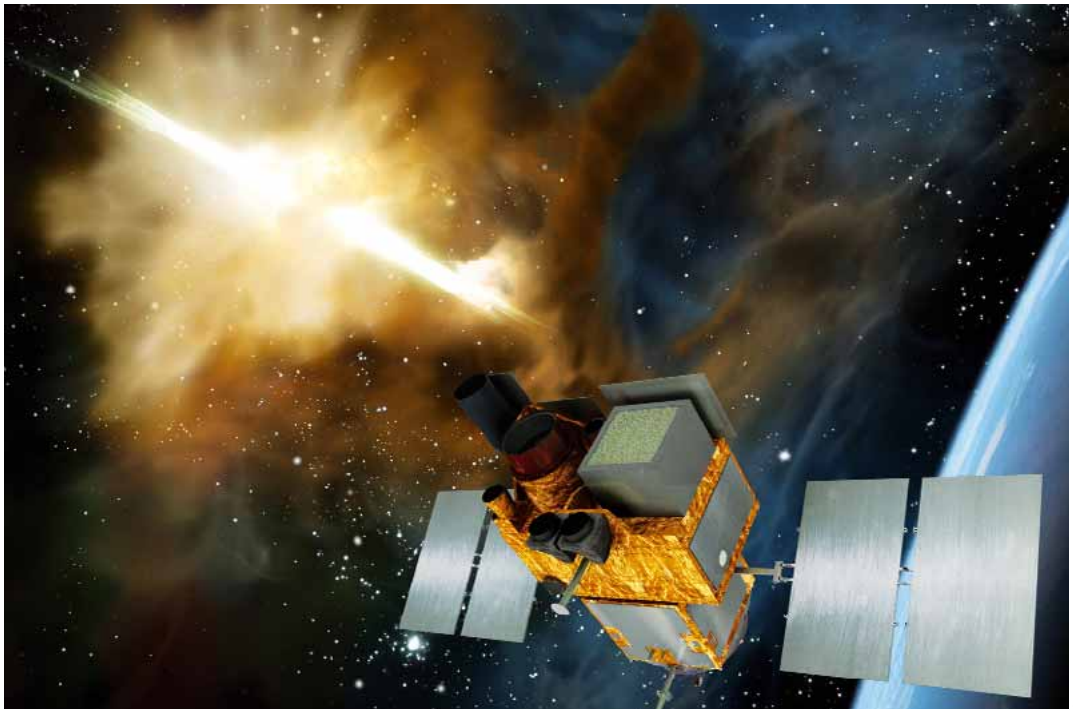
Anne de Vismes/CEA

Figure 2.
Image en microscopie électronique à balayage montrant le centre de l'élément après gravure.
Échelle 10µm.

> **Claude Fermon**
et **Myriam Pannetier-Lecœur**
Service de physique de l'état condensé (Spec)
Institut rayonnement matière de Saclay (Iramis)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay

> **Anne de Vismes**
Institut de radioprotection
et de sûreté nucléaire (IRSN)
Centre du Bois des Rames (Orsay)

SVOM, un satellite pour détecter l'explosion des premières étoiles formées dans l'Univers



Cnes

Vue d'artiste du satellite SVOM.

En 2014, sera lancé le satellite SVOM (pour *Space based multi-band Variable Object Monitor*) pour scruter les **sursauts gamma**, autrement dit les événements les plus violents de l'Univers depuis le **big bang**. Leur éclat extrême devrait permettre la détection des premières **étoiles** de l'Univers, ainsi que l'arpentage du cosmos, en les utilisant comme des chandelles astronomiques. Cet éclat leur vient d'une émission en **rayons gamma**, très forte mais également très fugace : de 0,1 à 100 secondes. À cette première émission succède toujours une seconde, celle-ci beaucoup plus faible, décroissante dans le temps et couvrant une large bande allant du **rayonnement X** à celui de l'**infrarouge** en passant par le **rayonnement visible**. Le caractère éphémère du phénomène gamma, et la volonté de l'observer simultanément dans une large bande spectrale, impliquaient des moyens adaptés. D'où la mission SVOM avec sa panoplie de télescopes, installés à la fois dans l'espace et au sol, avec une sensibilité allant des rayons gamma à la lumière infrarouge. Cette complémentarité d'instruments en fait une expérience unique au monde pour l'étude des sursauts gamma, de leur émission prompte à leur émission rémanente. Il s'agit d'une coopération sino-française initiée entre l'**Agence spatiale chinoise**, l'Académie des sciences de Chine et le **Centre national d'études spatiales** (**Cnes**).

Au cœur de ce dispositif, figure le télescope ECLAIRs, l'initiateur de toute la chaîne de mesures de la mission. Développé à l'Irfu qui en assure la maîtrise d'œuvre, il s'agit de la principale contribution française à la charge utile du satellite SVOM. La mission d'ECLAIRs consistera à détecter l'apparition d'un sursaut gamma sur une portion de la voûte céleste et d'en déterminer la localisation avec une précision d'au moins 10 minutes d'arc – il devrait en détecter une centaine par an. L'optique classique ne permettant pas de focaliser les rayons gamma, les chercheurs se sont donc orientés vers l'imagerie par masque codé. Comme son nom l'indique, le principe de cette technique consiste à placer un masque devant un plan de détection en sachant qu'à une position donnée d'une source dans le ciel, correspond une projection unique du motif de masque sur le plan de détection. Reste ensuite à utiliser un outil mathématique pour reconstruire l'image qui permettra de remonter à la direction de la source. Le masque codé se compose d'une plaque de tantale perforée d'un motif choisi, tendue sur un cadre de titane afin de compenser les déformations thermiques – une réalisation du **Laboratoire astroparticule et cosmologie de Paris**. Ce masque est supporté par une structure en carbone rigide et légère, entourée d'un blindage multicouche de plomb, cuivre et aluminium, dont le rôle consiste à arrêter les **photons** ne provenant pas du champ de vue défini par le masque.

Réalisé par le **Centre d'étude spatiale des rayonnements de Toulouse**, le plan de détection associe des cristaux détecteurs de tellurure de cadmium et des circuits intégrés de lecture analogique bas bruit (*Application-Specific Integrated Circuit/ASIC*). L'assemblage réalise un empilement compact de céramiques jusqu'à former une unité de détection de 6 400 **pixels** pour une surface de 1 024 cm^2. Refroidi par un système performant utilisant des caloducs à conductance variable, sa température d'ensemble se situe à -20 °C. Une attention toute particulière a été

portée à la valeur du seuil bas de détection. Grâce au choix rigoureux des détecteurs élémentaires et à une maitrise aiguë du bruit de l'électronique, un seuil bas à 4 **keV** a pu être obtenu. Il s'agit d'un résultat crucial pour le télescope, notamment pour détecter des événements situés à des distances cosmologiques où les photons se décalent vers les basses énergies. L'ASIC a été développé par l'Irfu tandis que l'optimisation du couple détecteur/ASIC vient d'une de ses activités de R&D.

Également développée par l'Irfu, l'unité de traitement scientifique embarquée F-UTS[1] devra déceler et localiser, en temps réel, l'apparition d'un sursaut gamma sur la voûte céleste, puis analyser les données issues du plan de détection concernant les photons. La conception du F-UTS s'opère autour d'un microprocesseur embarqué tolérant aux **radiations** spatiales. L'**algorithme** scientifique embarqué emploie deux méthodes de détection de sursauts. Celle dédiée aux sursauts gamma longs reconstruit des images du ciel toutes les 20 secondes pour y rechercher l'apparition d'une nouvelle source. Sensible aux sursauts gamma plus courts, la seconde scrute tous les intervalles de temps, jusqu'à 10 ms, pour déceler une augmentation du nombre de photons détectés, ce qui lui permettra de reconstruire l'image du ciel et donc de trouver la source. Une fois le sursaut gamma localisé, le satellite SVOM se réoriente de manière à pouvoir observer l'émission rémanente grâce aux télescopes embarqués dédiés aux rayonnements X et visibles à petit champ de vue. En parallèle, le F-UTS prépare un message d'alerte. Rapidement envoyé au sol à l'aide d'un émetteur VHF, couplé à une trentaine de stations de réception réparties au sol sous la trajectoire du satellite, ce message déclenchera l'observation de la rémanence du sursaut gamma par les télescopes terrestres. Grâce à cette observation, il devient alors possible de déterminer la distance de l'événement.

La mise en œuvre de solutions performantes et novatrices témoigne du savoir-faire acquis par les équipes techniques en instrumentation spatiale. Fort de cette expérience, SVOM ouvrira une fenêtre nouvelle sur l'Univers, celle donnant sur la connaissance de ces phénomènes lointains que sont les sursauts gamma. Mais pour cela, il faut attendre 2014.

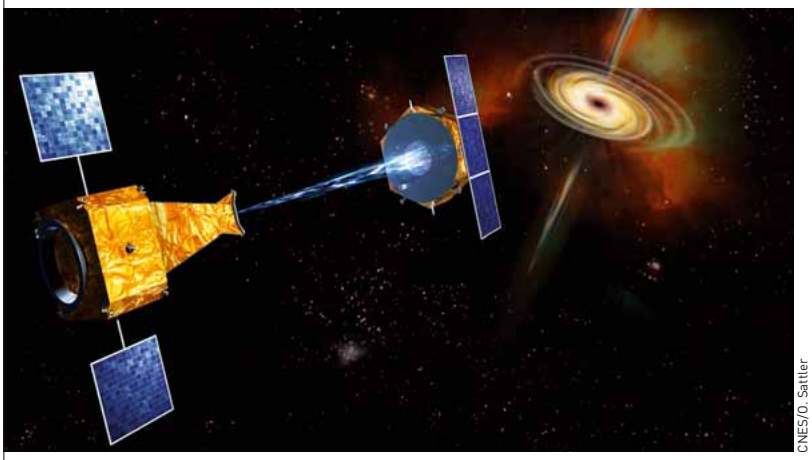
(1) « F » pour *Français*.

> Bertrand Cordier
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles (CEA-Université de Paris 7-CNRS).
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

> Michel Fesquet
Service d'électronique des détecteurs et d'informatique (Sedi)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay

2. Voir plus précis

Simbol-X, pionnier des vols en formation



CNES/O. Sattler

Vue d'artiste de Simbol–X observant une galaxie active. Le satellite de droite porte le miroir qui focalise les rayons X sur le détecteur placé sur le satellite de gauche, 20 mètres plus loin.

S'il existe dans le ciel des témoins de l'activité des sources extrêmes de l'Univers, ce sont bien les **rayons X** et **gamma** nés de **plasmas** portés à des centaines de millions de degrés ou de particules accélérées à des énergies jusqu'à un milliard de fois supérieures à celles de nos accélérateurs les plus puissants. D'où l'intérêt manifesté par les astrophysiciens pour scruter le ciel dans ce domaine de **rayonnement**. Peut-être pourront-ils ainsi répondre un jour aux questions fondamentales de l'astrophysique moderne – celles posées notamment sur les **trous noirs** dont on approche l'horizon, au plus près, dans le spectre des rayons X, ou encore, celles de l'origine des **rayons cosmiques**. Ces trous noirs, combien sont-ils dans l'Univers ? Qui sont-ils ? Influencent-ils leur environnement ? Quel rôle jouèrent-ils dans la formation des **galaxies** ? De quelle manière, par ailleurs, fonctionnent les accélérateurs cosmiques ? Peut-on expliquer tous les rayons cosmiques ?

Le télescope spatial Simbol-X a été conçu pour tenter de répondre à ces questions en observant le ciel, très loin et très précisément. Si aucun instrument n'a pu le faire avant lui, c'est en raison du caractère trop pénétrant des **photons** X et gamma qui empêche l'utilisation de télescopes de facture classique où ils seraient collectés et réfléchis par un grand miroir pour être concentrés sur un petit détecteur. À l'instar de nos tissus, lors des radiographies médicales, ces miroirs sont transparents aux rayons X. Aussi, l'optique des meilleurs instruments imageurs en rayons X et gamma, comme IBIS (pour *Imager on Board the Integral Satellite*) installé à bord d'INTEGRAL (pour *International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory*) se compose d'un masque codé permettant d'obtenir de véritables images avec une **résolution** angulaire encore faible d'une dizaine de minutes d'arc (un tiers de la Lune vue de la Terre). Mais, ne focalisant pas la lumière, ces instruments ne bénéficient pas de l'effet de concentration qui donne leur puissance aux télescopes

classiques. Heureusement, un moyen existe pour focaliser les rayons X. Il s'appuie sur le fait que ces rayons peuvent être réfléchis sur des surfaces très lisses à condition de les aborder de façon quasiparallèle. En combinant plusieurs de ces matériaux réfléchissants, sous forme de coquilles de révolution emboitées comme des poupées gigognes, on arrive à réaliser des optiques focalisatrices de grande surface que les rayons X « traversent » avant d'atteindre le détecteur au foyer du système. L'énergie maximale à laquelle l'optique peut fonctionner s'avère proportionnelle à la longueur du télescope. La première optique de focalisation X, emportée dans l'espace, en 1978, révolutionna l'astronomie X. Mais elle se limitait à l'observation des rayons X de relativement basse énergie, dits « mous ». Aujourd'hui, la situation demeure inchangée.

La mission Simbol-X met en œuvre la technologie émergente du vol en formation pour fabriquer, pour la première fois, un télescope de très grande focale. Ce nouveau concept révolutionnaire consiste à placer l'optique focalisatrice de rayons X sur un premier satellite et le plan focal sur un second, asservi en position par rapport au premier, de façon à former, en quelque sorte, un télescope quasiment rigide mais sans tube. Avec une telle configuration, le télescope peut être sensible aux rayons X dits « durs », c'est-à-dire dix fois plus énergétiques que les rayons X « mous ». Cet instrument à focalisation de nouvelle génération est cent à mille fois plus performant que les meilleurs instruments actuels.

L'idée de Simbol–X fut proposée dès la fin 2001, par les astrophysiciens du CEA. Portée par les communautés scientifiques française, italienne et allemande, la phase d'étude de faisabilité du projet a été passée avec succès. Elle a été conduite par les agences spatiales française et italienne ainsi qu'une vingtaine de laboratoires français, italiens et allemands, réunis sous la responsabilité conjointe du CEA et de l'Italie. Parmi les éléments clefs de Simbol–X figurent notamment :

- l'optique X, placée sous la responsabilité italienne, qui bénéficie du savoir-faire acquis lors des missions d'astronomie X à basse énergie, notamment celle du satellite XMM (pour *X-ray Multi Mirror*) ; ses caractéristiques principales résident dans sa focale de 20 mètres et son excellente résolution angulaire de 20 secondes d'arc ;
- le vol en formation, une première donc, dépend du **Cnes** ; le défi consiste à pouvoir garder, de façon automatique, le satellite « détecteur » positionné autour du point focal donné par l'optique avec une incertitude de l'ordre du cm^3 ;
- l'ensemble détecteur, fabriqué par la France avec une participation de laboratoires allemands, doit couvrir entre 0,5 et 80 **kiloélectronvolts**, s'avérer extrêmement sensible et être doté d'une grande finesse d'imagerie.

Pour répondre à son exigeant cahier des charges, l'ensemble détecteur se base sur la superposition de deux plans « spectro-imageurs » de 16 384 **pixels** couvrant 8 x 8 cm^2 au total (figure 1).

Pour chaque photon X (comptés un par un à ces énergies), ils en mesurent l'énergie et la localisation sur le détecteur. Le premier plan spectro-imageur, en silicium, fourni par une équipe allemande, détecte les rayons X « mous » avec une vitesse de lecture 20 000 fois plus rapide que ses prédécesseurs. Le silicium étant transparent aux rayons X de plus haute énergie qui sont bien plus pénétrants, un second plan lui a été adjoint, juste en dessous du premier, de manière à pouvoir arrêter et caractériser ces rayons. Ce deuxième plan est réalisé par le CEA, à base de cristaux de tellure de cadmium (CdTe), matériau ayant déjà prouvé son efficacité dans l'imageur à masque codé d'INTEGRAL. Depuis le lancement de ce satellite, d'importantes avancées ont été enregistrées concernant la miniaturisation (les pixels de Simbol–X étant 50 fois plus petits) et la réduction maximale des zones insensibles entre les pixels. Le plan imageur haute énergie est construit en juxtaposant 64 mini-caméras X, de 1 cm^2 de côté, avec chacune 256 pixels complètement adjacents et comprenant toute l'électronique critique à leur fonctionnement (figure 1). Un système compact de blindage et de détecteurs de particules entoure les deux plans imageurs. Fourni par le **Laboratoire astroparticules et cosmologie** (**APC**) de Paris, il réduit, d'un facteur 10, les bruits parasites engendrés par les nombreux rayons cosmiques peuplant l'espace interplanétaire. Ce plan focal, étudié sous responsabilité de l'Irfu, dispose également d'un traitement de données de bord géré par le **Centre d'études spatiales des rayonnements** (**CESR**) de Toulouse.

Les agences spatiales italienne et française n'ayant pu réunir les fonds suffisants pour financer cet ambitieux projet, celui-ci n'a pu entrer dans la phase d'étude détaillée. Étant donné la qualité de la « science à faire » avec ce projet et la large communauté de chercheurs intéressée, il devrait renaître dans un autre contexte.

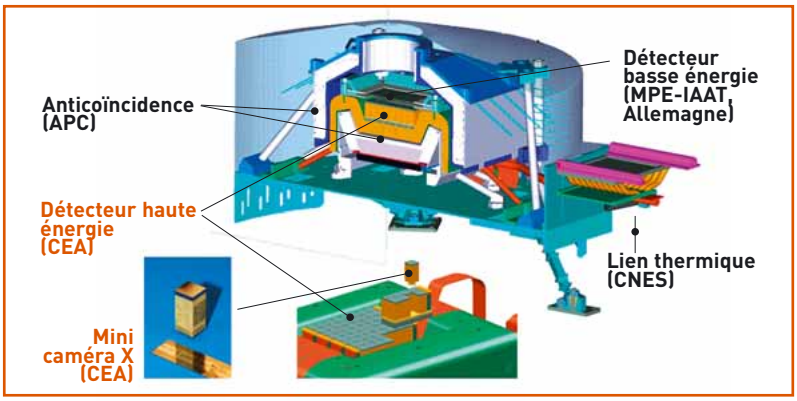


Figure 1.
L'ensemble du plan focal de détection, placé sous responsabilité de l'Irfu, avec ses différents éléments et les laboratoires les fournissant : CEA, Laboratoire astroparticule et cosmologie (APC), Max Planck Institut für extraterrestrische Physic, Institut für Astronomie und Astrophysik-Tübingen (IAAt), Cnes. Les différents composants et leur fonctionnement sont décrits en détail dans le texte.

> Philippe Ferrando
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Unité mixte de recherche astroparticule et cosmologie
(CNRS-Université de Paris 7-CEA-Observatoire de Paris)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

> Martial Authier
Service d'ingénierie des systèmes (SIS)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

ELT/METIS, un géant de 42 mètres

ESO

Vue d'artiste de l'E-ELT (pour *European Extremely Large Telescope*), un télescope de 42 mètres de diamètre que l'ESO est en train d'étudier ; à noter, sur la droite de la vue, les deux voitures qui donnent l'échelle de ce télescope géant.

Fort des succès remportés par le programme *Very Large Telescope* (VLT), un ensemble de 4 télescopes de 8 mètres de diamètre, l'**Observatoire européen austral** (*European Southern Observatory/ESO*) relève aujourd'hui un nouveau défi : celui de réaliser un télescope doté d'un miroir de 42 m de diamètre (1 300 m^2). Construire un miroir de cette surface et d'un seul tenant est aujourd'hui encore totalement impossible. D'où l'idée d'en segmenter la surface en un millier de pièces hexagonales mesurant chacune 1,4 mètre de large. Lourd de 5 000 tonnes (la moitié du poids de la tour Eiffel), ce géant portera le nom d'*European-Extremely Large Telescope* (E-ELT) et devrait être opérationnel à l'horizon 2018. Son site d'installation ne sera dévoilé que début 2010 : peut-être le Chili, l'Argentine ou encore l'île de La Palma aux Canaries. Comme son prédécesseur VLT, le télescope E-ELT observera le cosmos, à partir du sol, dans la gamme de rayonnements proche des ultra-violets, visibles et infrarouges.

Augmenter la taille d'un télescope présente un double avantage. D'abord, celui de détecter des objets plus faibles ou plus lointains, grâce à une surface collectrice plus grande. Ensuite, celui de voir les objets avec une finesse de détail plus grande. En effet, suivant le phénomène physique de diffraction de la lumière, l'image d'un objet ponctuel à travers un télescope ne donne pas un point, mais une tache, dite « tache de diffraction ». En conséquence, plus le diamètre du télescope s'avère grand, plus cette tache est petite. Ainsi la tache de diffraction d'une étoile, à travers l'E-ELT, aura-t-elle une surface 25 fois plus petite et que celle des images produites jusque-là par VLT. Ces deux avantages combinés permettront de conduire des programmes uniques, notamment celui d'étudier les disques entourant les **étoiles**, lieux de formation des **planètes**, voire d'observer directement l'émission thermique d'exoplanètes géantes.

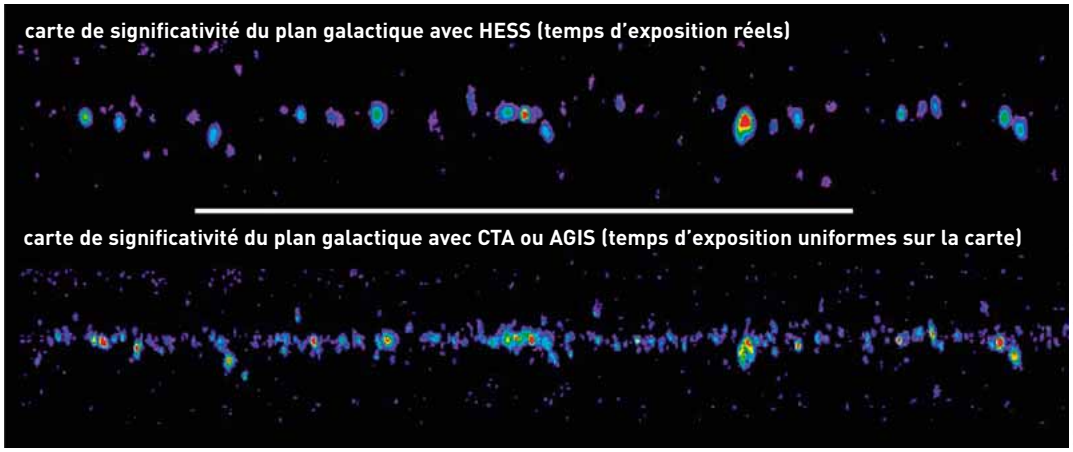
Parallèlement aux études menées en vue de la réalisation du télescope E-ELT, l'ESO a lancé plusieurs appels d'offre aux laboratoires européens concernant les instruments dédiés aux foyers du télescope. Compte tenu de son expérience exceptionnelle dans le domaine de l'infrarouge dit « moyen »[1], le Service d'astrophysique (SAp) du CEA (Irfu) a rejoint un consortium de laboratoires dirigé par l'**Observatoire de Leiden** (Pays Bas) pour mener les études préliminaires sur le futur instrument METIS (pour *Mid-infrared E-ELT Imager and Spectrograph*) prévu pour équiper l'E-ELT. Outre l'étude des cryomécanismes développés avec le Service d'ingénierie des systèmes (SIS), le SAp a pris en charge l'imagerie d'objets avec un fort contraste d'intensité (par exemple, le cas d'une planète située à côté d'une étoile) qui nécessite des modes d'observation particuliers comme la coronographie ou l'imagerie différentielle.

Le domaine du rayonnement infrarouge moyen s'est développé en trente ans d'une manière impressionnante. Au début des années 1990, le SAp figurait déjà en pionnier en matière d'imagerie du cosmos à partir du sol dans ce type de rayonnement, notamment grâce à des matrices de détecteurs développées par le Laboratoire d'électronique et de technologies de l'information (Leti) – sous-produit des importants développements de matrices de détecteurs réalisés dans le cadre du projet spatial ISOCAM. À l'époque, les images ne dépassaient pas les quelques milliers de pixels et provenaient d'un télescope de quelques mètres de diamètre seulement. Trente ans après, nous allons pouvoir accéder à des images d'un million de pixels obtenues avec un télescope 100 fois plus puissant, soit une progression d'un facteur 100 000 !

> **Pierre-Olivier Lagage** et **Eric Pantin**
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles (CEA-Université de Paris 7-CNRS).
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

(1) Il s'agit du rayonnement ayant une longueur d'onde située entre 5 et 25 micromètres.

Une centaine de télescopes en réseau pour CTA



S.Funk, J-A. Hinton, G. Hermann, S. Digel

Figure 1
Amélioration de la carte astronomique du plan galactique prédite en passant de HESS au CTA.
Le nombre de sources détectées devrait s'accroître de plus d'un ordre de grandeur.

Dans le sillage de l'expérience européenne HESS (pour *High Enegy Stereoscopic System*)[1] et de ses succès dans le domaine de l'observation en astronomie gamma de très haute énergie, le futur CTA (pour *Cherenkov Telescope Array*) s'inscrit dans le grand projet de réseau européen de télescopes Cherenkov de nouvelle génération. Son originalité réside dans la position de ses deux réseaux d'imageurs Cherenkov atmosphériques. Le premier, implanté dans l'hémisphère Nord, observera dans la bande de basse énergie allant de 10 **GeV** à 1 TeV. Son jumeau sera positionné dans l'hémisphère Sud et dédié à la bande d'énergie allant de 10 GeV à 100 TeV. Au cœur du réseau CTA-sud figurent quatre télescopes dotés de miroirs d'environ 20 mètres de diamètre. Un anneau formé par plusieurs dizaines de télescopes de douze mètres de diamètre, semblables à ceux équipant déjà le télescope HESS, formera un premier cercle autour de ces instruments – dispositif complété par un deuxième cercle d'une autre dizaine de télescopes, possédant des miroirs de six mètres de diamètre. Avec ce dispositif complexe, le CTA observera des flux de rayonnement dix fois plus faibles que ceux détectés actuellement par HESS. Avec l'introduction d'un nombre important de télescopes dans le réseau, le nouveau CTA sera bientôt capable d'obtenir des **résolutions** angulaires de l'ordre de la minute d'arc.

Plusieurs équipes de chercheurs, majoritairement européennes, collaborent à la conception et la construction du CTA. Pour la France, il s'agit du CEA avec l'Irfu et du **CNRS** avec l'**Institut national de physique nucléaire et de physique des particules** (**IN2P3**) et l'**Institut national des sciences de l'Univers** (**Insu**). Actuellement en cours, la phase de conception et de construction des prototypes se poursuivra jusqu'en 2011-2012. Le projet CTA figure sur la feuille de route du Forum stratégique européen pour les infrastructures de recherche (*European Strategy Forum on Research Infrastructures*/Esfri) et participe à deux réseaux européens ERAnet : Astro Particle ERAnet (ASPERA) et Astronet.

(1) En hommage au physicien autrichien Victor Hess (1883-1964), prix Nobel de physique, en 1936, pour la découverte du rayonnement cosmique.

> Jean-François Glicenstein
Service de physique des particules (SPP)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

3. Voir plus large

Euclid, cartographe du ciel extragalactique

C'est le mathématicien grec Euclide qui a donné son nom au futur télescope chargé d'explorer la part sombre de l'Univers, celle qui échappe encore à l'observation des chercheurs, à savoir, l'**énergie noire** et la **matière noire** – soit près de 95 % de cet Univers. Cette mission d'étude utilisera comme données la cartographie du ciel extragalactique. Actuellement en cours d'étude de faisabilité, le projet Euclid a déjà été présélectionné par l'**Agence spatiale européenne** (**ESA**) dans le cadre de son programme *Cosmic Vision 2015-2025*. S'il est définitivement choisi, son lancement pourrait avoir lieu en 2017.

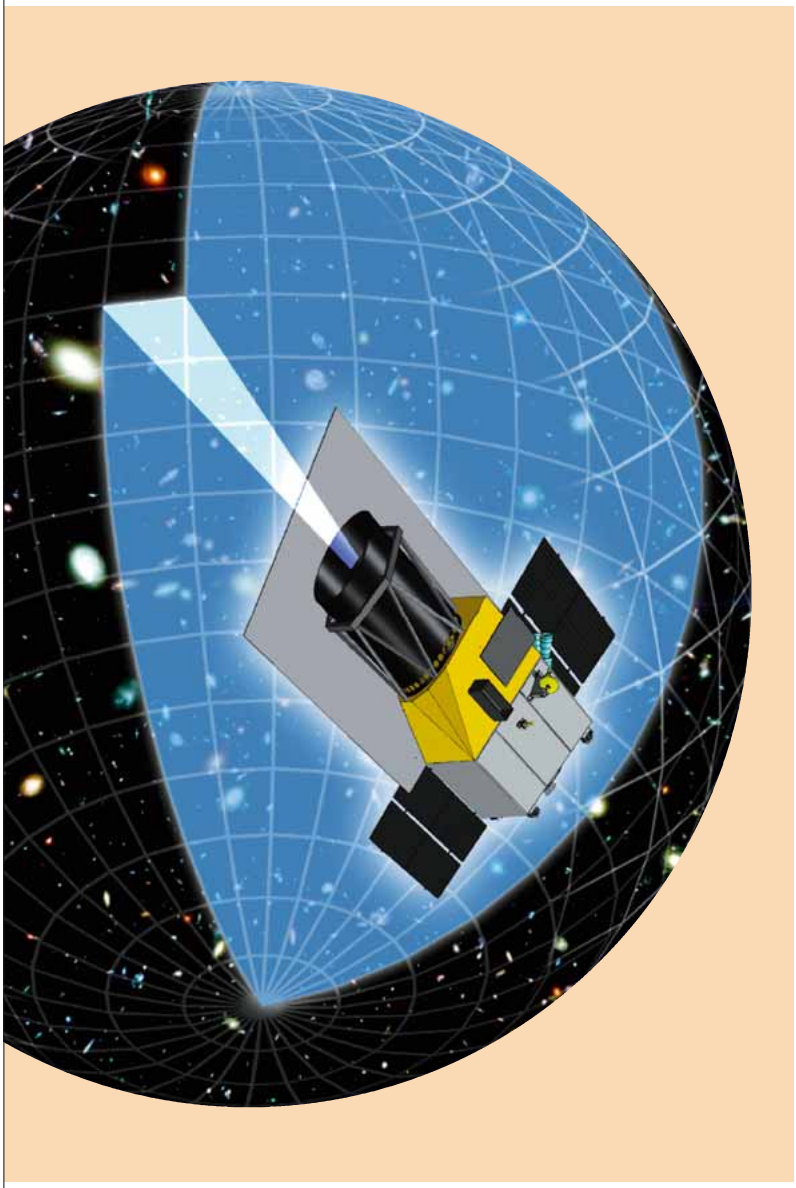
Les observations

Le projet Euclid part d'une constatation : la matière noire peut se détecter indirectement par ses **effets gravitationnels**, c'est-à-dire par les distorsions qu'elle fait subir à la lumière. Depuis Albert Einstein, les physiciens savent que la matière exerce une **attraction gravitationnelle** sur la lumière et peut ainsi fléchir sa trajectoire. En effet, la matière (visible ou noire), située entre l'observateur et la **galaxie** observée, déforme toujours l'image qui nous parvient de cette galaxie, un peu comme pourrait le faire une lentille. Il s'agit d'un effet connu dit de « cisaillement gravitationnel faible ». Ainsi, en observant des images de galaxies lointaines et en mesurant les déformations subies, les chercheurs peuvent-ils en déduire la distribution de la matière noire intercalée entre notre galaxie et des galaxies plus lointaines. Et procédant en cascade, de la distribution de la matière peut alors se déduire la nature de l'énergie noire, l'un des moteurs de structuration de l'Univers. Ensuite, en appliquant ce raisonnement à des galaxies situées à différentes distances, il devient également possible de mesurer l'évolution de l'énergie noire avec le temps.

Ce type de mesure a déjà été effectué, depuis l'espace, grâce au télescope Hubble et à ses milliers d'heures d'observation. Il s'agit du plus grand relevé de l'Univers jamais réalisé et il porte le nom de COSMOS (pour *Cosmic Evolution Survey*). Pourtant, ce relevé ne concerne qu'une toute petite partie du ciel avec une taille angulaire de seulement 2 degrés carrés, ce qui correspond, néanmoins, à neuf fois la surface apparente de la Lune. En parallèle, MEGACAM, une des deux plus grandes caméras d'imagerie astronomique au monde, installée au foyer du télescope au sol Canada-France-Hawaii, a réalisé un programme similaire mais sur une surface de ciel couvrant environ 200 degrés carrés. La synthèse des informations obtenues par ces deux observatoires a permis aux astrophysiciens de pouvoir déterminer la distribution spatiale de la matière noire et de la matière visible de cette région du ciel, avec une précision et une étendue inégalées.

Au vu des résultats du télescope Hubble, un double objectif chiffré a été fixé à Euclid. D'abord, il s'agira de déterminer le paramètre de l'équation d'état de l'énergie noire avec une précision de quelques pourcents et ensuite, d'établir la variation de ce paramètre, avec le temps, dans une précision de quelques dizaines de pourcents. Ce résultat suppose d'augmenter considérablement le nombre de galaxies mesurées de façon à limiter les erreurs statistiques. D'où la future mission fixée à Euclid d'observer 20 000 degrés carrés, soit la moitié du ciel, pour un total d'environ 3 milliards de galaxies. Quant à la détermination de la relation entre la distance et le décalage spectral, elle reposera sur la mesure des spectres de plus d'une centaine de millions de galaxies, là encore sur la moitié du ciel. L'évolution de la fonction de corrélation des galaxies[1] au vu du décalage spectral renseignera les chercheurs sur l'histoire de l'expansion de l'Univers et, par conséquent, sur la source de cette expansion. Les informations transmises par les deux sondes que sont la cartographie de la matière noire et les oscillations acoustiques baryoniques permettront de contraindre très précisément les paramètres de l'énergie noire.

(1) La fonction de corrélation des galaxies consiste, pour chaque paire de galaxies, à mesurer leur distance pour reconstruire une structure en 2D de la distribution des galaxies.



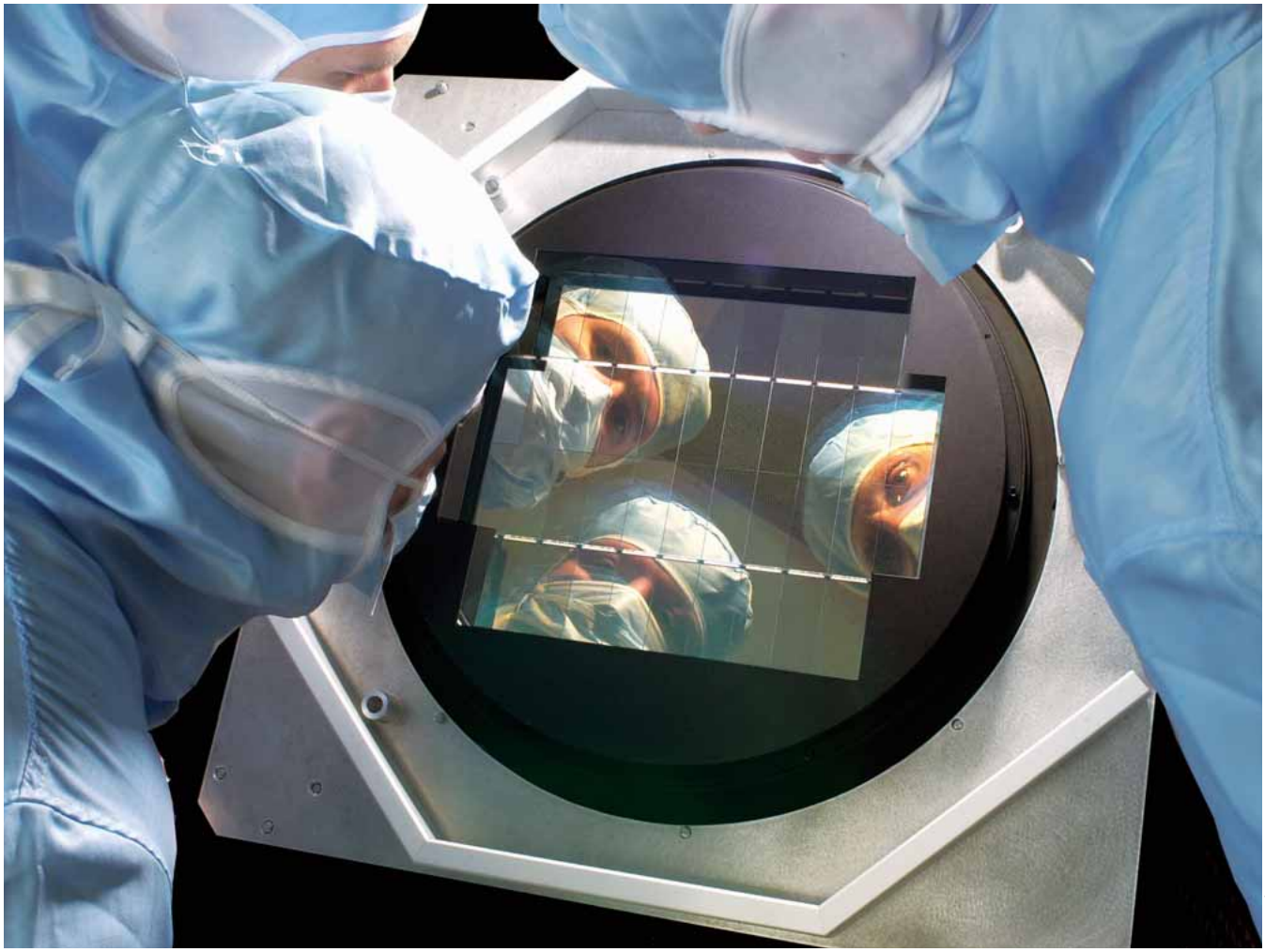
Frédéric Durillon/CEA

Vue d'artiste du satellite Euclid cartographiant l'Univers extragalactique.

La charge utile d'Euclid

Pour mener à bien ce programme d'observations et de cartographie de la matière noire, Euclid utilisera la technique dite de « l'imagerie grand champ » déjà expérimentée par MEGACAM. Cette technique consiste à réaliser des instruments disposant de détecteurs composés d'un très grand nombre de **pixels**. Chaque observation permet ainsi de prendre une photographie d'une grande surface du ciel, tout en conservant une très bonne résolution spatiale, nécessaire pour mesurer précisément la forme des images des galaxies.

Le satellite Euclid embarquera un télescope doté d'un miroir primaire de 1,20 mètre de diamètre. Au foyer de ce télescope, prendront place deux caméras.



J.J Bigot/CEA

Caméra MEGACAM : la mosaïque de 40 CCD en fin de montage. Cette caméra, réalisée par l'Irfu, est opérationnelle au foyer du télescope Canada-France-Hawaii depuis 2003.

La première caméra, dédiée à la **lumière visible**, se compose de 36 détecteurs de type *Charge coupled device* (CCD) pour un total de 600 millions de pixels. Elle réalisera la mesure de la forme des images de galaxies. Une deuxième caméra, travaillant celle-là en **lumière infrarouge**, composée d'environ 50 millions de pixels, fera des observations complémentaires pour mesurer la distance des galaxies. Enfin, un troisième instrument, indépendant des deux caméras d'imagerie, obtiendra les spectres de plus de 100 millions de galaxies, destinés à mesurer la relation entre la distance et le décalage spectral de ces objets.

La mission Euclid

La principale difficulté des observations de type « cisaillement gravitationnel faible » provient des erreurs de mesures systématiques. D'où la nécessité d'optimiser la conception des instruments, du télescope et du satellite, de façon à ce que les erreurs instrumentales s'avèrent plus faibles que les erreurs statistiques. Pour cette raison, le satellite Euclid sera placé en orbite autour du **point de Lagrange** L2, situé à 1,5 million de kilomètres de la Terre, dans la direction opposée au **Soleil**, où l'environnement thermique du satellite restera très stable. Les chercheurs espèrent que les instruments d'Euclid, prévus pour cinq à six années d'observation, donneront une qualité d'image très stable, autant spatialement dans tout le champ de vue du télescope que temporellement, pour que la qualité des données soit homogène. Quant à la conception de la charge utile, elle tient compte de la dégradation des performances des détecteurs du fait des **radiations** dans l'espace. Aujourd'hui, l'Irfu dirige un consortium de laboratoires, composé d'une demi-douzaine de pays européens et d'un laboratoire américain, pour étudier l'instrument d'imagerie en charge des mesures de « cisaillement gravitationnel faible ». L'enveloppe financière actuellement impartie à cette mission spatiale s'élève à 450 millions d'euros apportés par l'ESA, un budget complété par la contribution des différentes agences spatiales nationales. Quatre autres missions demeurent à l'étude, dont deux seront sélectionnées début 2010. Il faudra attendre 2011 pour connaître le projet finaliste et 2017 pour son lancement.

> Olivier Boulade
et **Alexandre Refregier**
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles
(CEA-Université de Paris 7-CNRS).
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

4. Antarès : le neutrino, un autre messager du cosmos

L. Fabre/CEA

Immersion d'un étage à trois « yeux » lors du déploiement de la première ligne d'Antarès à 40 kilomètres de la Seyne-sur-Mer.

S'il est un lieu où une personne non initiée n'irait pas chercher un télescope, c'est bien dans les profondeurs marines. Pourtant, l'expérience Antarès (pour *Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch*) observe les cieux par 2 500 mètres au fond de la mer Méditerranée, à 40 kilomètres au large de Toulon. Placer un télescope observant vers le bas, à travers la terre, et donc à l'inverse des instruments tournés vers le ciel, pourrait paraitre saugrenu *a priori*. Pour les chercheurs, il s'agit d'un endroit qui pourrait permettre de contribuer à résoudre une énigme encore indéchiffrée de l'astrophysique : l'origine du **rayonnement cosmique** qui pourtant bombarde l'atmosphère en permanence.

Pour comprendre l'expérience Antarès, il faut savoir que les rayons cosmiques les plus énergétiques naissent d'événements comme les échanges de matière dans les **étoiles** binaires, l'explosion de **supernovae** dans la **Voie lactée**, les jets des *noyaux* actifs de **galaxies** ou les **sursauts gamma** dans les zones plus éloignées du cosmos. Il faut savoir encore que les **photons** gamma, aux énergies les plus extrêmes, ne permettent de sonder les phénomènes cataclysmiques que dans la proche banlieue de la galaxie. Difficulté supplémentaire : les particules constituant le rayonnement cosmique – pour l'essentiel des **protons** – sont rapidement arrêtées ou, à plus basse énergie, déviées par les **champs magnétiques** intergalactiques. La solution à l'ensemble de ces problèmes passe par le **neutrino**. Produit dans les objets où le rayonnement cosmique s'accélère, il s'agit d'une particule élémentaire neutre et donc insensible aux champs magnétiques – il n'interagit que faiblement avec la matière et rend donc l'Univers transparent. Il permet de sonder le cœur des objets les plus denses. Mais cet avantage devient un inconvénient : il les rend extrêmement difficile à observer. D'où l'idée de concevoir un détecteur, suffisamment grand pour pouvoir déceler quelques rares interactions de ces particules fugaces, et immergé pour atténuer le flux du rayonnement cosmique. Il recevra le nom d'Antarès.

Qu'il soit immergé augmente les chances d'observer les neutrinos en se servant de la Terre comme cible. En effet, un neutrino qui interagit avec la croûte terrestre crée un « **muon** » émis dans la même direction. En arrivant dans le milieu marin, celui-ci produit alors des photons Cherenkov. Antarès peut les observer grâce à son réseau de 900 photodétecteurs installés sur 12 lignes, hautes de 450 mètres, espacées de 65 mètres, dont la surface d'ancrage équivaut à quatre terrains de football (figure 1). Chaque ligne est maintenue verticale par des bouées et comporte 25 étages équipés de trois photomultiplicateurs et d'une électronique embarquée capable de transmettre

L. Fabre/CEA

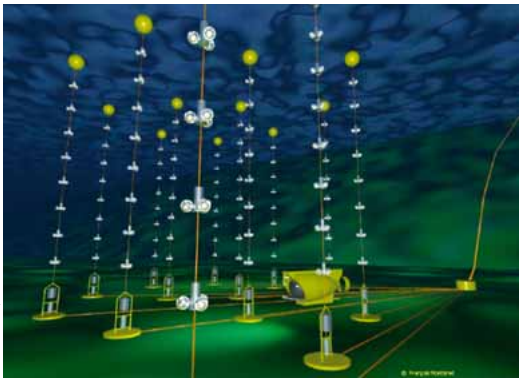
Ligne d'Antarès en attente d'être déployée.

des signaux, en temps réel, vers la côte. Là, une « ferme » de plusieurs dizaines d'ordinateurs filtre la centaine de photons recueillie pour chaque muon, de la lumière parasite due à la **radioactivité naturelle** et à la faune bioluminescente.

Opérationnel depuis 2006, Antarès a permis d'accumuler un grand nombre de données, notamment des dizaines de millions de muons descendants provenant de l'interaction du rayonnement cosmique dans l'atmosphère, malgré le blindage d'eau placé au-dessus du détecteur. Mais ce sont également des muons montants, un phénomène beaucoup plus rare – seulement quelques milliers par an – induits par des neutrinos dits atmosphériques, les seules particules produites lors de l'interaction du rayonnement cosmique aux antipodes qui soient capables de traverser la Terre. Une fois leur direction déterminée, ces neutrinos peuplent uniformément la carte du ciel et constituent ce que les physiciens des astroparticules appellent « un bruit de fond ». La découverte d'une source cosmique n'interviendra qu'à l'occasion d'une accumulation anormale de quelques neutrinos de haute énergie observée sur cette carte. Mais la détection d'une telle source apportera la preuve irréfutable de la présence d'un accélérateur du rayonnement cosmique.

Compte tenu du très faible nombre d'événements attendus, le développement de l'astronomie neutrinos appelle un détecteur aux dimensions kilométriques, soit 50 fois plus grand qu'Antarès et doté de plusieurs milliers de photomultiplicateurs. L'étude de ce télescope du futur a déjà commencé au sein du consortium KM3NeT (pour *Km^3 scale Neutrino Telescope*), un consortium regroupant 40 laboratoires appartenant à 10 pays européens et financé avec l'aide l'Union européenne.

Prévue pour 2012, le début de la construction de l'instrument concrétisera une infrastructure pluridisciplinaire unique au monde dans le domaine des sciences environnementales (océanographie, sismologie, zoologie marine, climatologie...). En l'attendant, Antarès continue de scruter le ciel de l'hémisphère Sud, à travers la Terre, à la recherche de l'origine du rayonnement cosmique.



F. Montanet,/CNRS/IN2P3 et UFJ.

Figure 1.
Vue d'artiste du détecteur Antarès, un réseau de 900 photodétecteurs équipant 12 lignes de 450 mètres de haut à 2 500 mètres de profondeur. Ces lignes délimitent un volume de 20 millions de tonnes d'eau utilisée pour observer la lumière Cherenkov des particules qui la traverse (les échelles et le nombre d'éléments ne sont pas respectés).

> Thierry Stolarczyk
Service de physique des particules (SPP)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

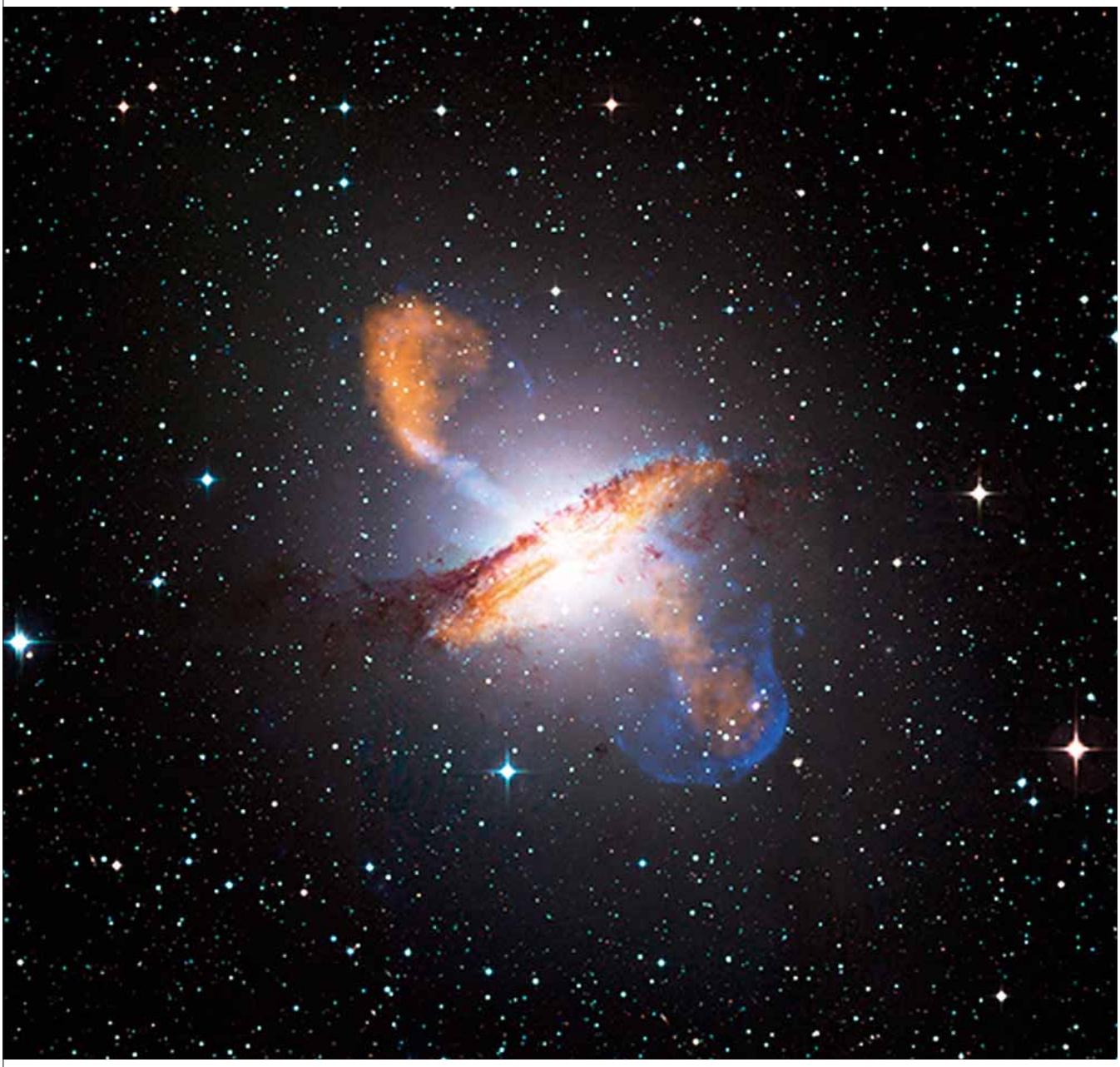
POUR EN SAVOIR PLUS

T. Stolarczyk, *Le neutrino, particule ordinaire*, Collection Les petites pommes du savoir, Éditions du Pommier, 2008.

http://antares.in2p3.fr et http://www.km3net.org

Des **spectro-imageurs** de nouvelle génération

En même temps que l'Année mondiale de l'astronomie, 2009 célébrera le 400e anniversaire des premières observations faites avec une lunette astronomique, par Thomas Harriot et Galileo Galilei, sur les montagnes lunaires, les taches solaires, les phases de Vénus ou encore les satellites de Jupiter. **Aujourd'hui, les astrophysiciens ne se contentent plus de télescopes posés à terre mais envoient leurs observatoires dans l'espace pour mieux scruter l'Univers.** Parmi les instruments embarqués figurent les spectro-imageurs capables de faire, à la fois, de la spectrométrie et de l'imagerie. La contribution du CEA a été particulièrement significative dans la conception, le développement, la construction, la qualification de ces instruments dont une nouvelle génération est en train de naître.



ESO

Centaurus A, vue en optique, en ondes submillimétriques (orange) et en rayons X (bleu).

Observer l'Univers dans le domaine de la lumière submillimétrique

Le 14 mai 2009, Herschel et Planck, deux satellites de l'Agence spatiale européenne (ESA) dont le poids avoisine les cinq tonnes, ont été lancés ensemble par une fusée Ariane 5, à partir du Centre spatial guyanais de Kourou, et placés sur une orbite solaire à 1,5 million de kilomètres de la Terre, plus précisément au point de Lagrange L2, considéré comme le meilleur endroit accessible pour observer les rayonnements de longueurs d'onde submillimétriques et millimétriques.

Le CEA, fortement soutenu par le **Cnes**, a contribué au développement, à la réalisation et à la qualification de deux des trois instruments embarqués par Herschel. Il s'agit de PACS (pour *Photodetector Array Camera and Spectrometer*) et de SPIRE (pour *Spectral and Photometric Imaging Receiver*), deux spectro-imageurs bolométriques de moyenne résolution : le premier efficace dans la gamme spectrale 60-210 µm et le second entre 200 et 650 µm.

Dans le froid des premiers temps galactiques

Herschel, avec son miroir de 3,5 mètres de diamètre, est le plus grand télescope spatial placé en orbite à ce jour. Conçu au profit de l'ensemble de la communauté astronomique mondiale, il embarque un imposant cryostat de 2 500 litres d'**hélium**, liquide superfluide destiné à refroidir les instruments à des températures inférieures à -271 °C. Pour les astrophysiciens, il s'agit de minimiser l'émission **infrarouge** et submillimétrique du nouvel observatoire et donc d'augmenter le contraste des sources observées.

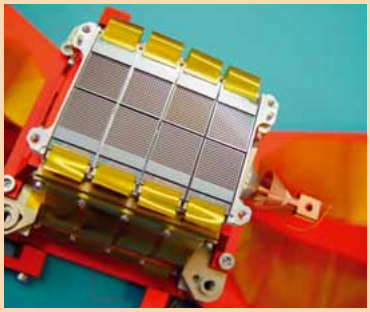
Le télescope spatial Herschel va ouvrir une nouvelle fenêtre d'observation, celle donnant sur l'Univers froid. Là s'initient les phases les plus précoces de la gestation des **étoiles** mais aussi les étapes les moins connues de l'évolution des **galaxies**. Il faut dire, qu'à ce jour, les **modèles** mis à la disposition des chercheurs en matière de formation et d'évolution s'avèrent encore insuffisamment confrontés à la réalité des observations. La première cause en est que ces phénomènes ne sont pas lisibles en **lumière visible**, mais uniquement dans l'infrarouge lointain et au-delà. Or, ces gammes de **longueur d'onde** souffrent d'une forte **absorption** du **rayonnement** par l'atmosphère. Herschel remédie à cette situation en apportant des mesures de température et de densité de matière, en révélant les espèces moléculaires en jeu, mais aussi en apportant des informations sur la dynamique des objets étudiés. L'autre raison permettant de comprendre l'insuffisance des détecteurs actuels tient aussi à l'**opacité** atmosphérique. Il aura fallu attendre le début des années 1990 et l'apparition des premiers détecteurs bolométriques pour que les chercheurs disposent enfin d'instruments suffisamment sensibles pour mesurer le rayonnement dans le domaine millimétrique.

L'observatoire Herschel a grandement contribué au développement de ces **bolomètres** aux longueurs d'onde inférieures au millimètre et à stimuler les recherches technologiques en la matière (voir encadré).

ESA

Le 14 juin 2009, le télescope spatial Herschel, alors situé à plus d'un million de kilomètres de la Terre, a porté son premier regard sur une galaxie. Cette image de l'Univers dans l'infrarouge submillimétrique, avec une finesse de résolution inédite, a été saisie par la caméra de bolomètres de l'instrument PACS, conçue et réalisée par le CEA.

Un bolomètre (du grec *bolè* qui signifie « radiation » et *metron*, « la mesure ») est un détecteur thermique de rayonnement. Il s'agit donc d'un dispositif capable de mesurer un flux d'énergie incident, porté par des **photons** ou des particules massives, et de le convertir en chaleur. Pour une quantité d'énergie donnée, plus la masse (donc la capacité calorifique) du dispositif est faible, plus l'élévation de température s'avère importante. À très basse température, ce phénomène s'amplifie par une forte chute de la capacité calorifique de la matière.



CEA

Le bolomètre est une sorte de thermomètre ultrasensible, capable de déceler d'infimes variations de température (quelques millionièmes de degré). Ici, le plan focal bolométrique 32x64 pixels de l'instrument PACS.

NASA

À droite : une vue d'artiste du satellite Herschel dont le télescope et l'instrumentation ont été placés au-dessus d'un réservoir d'hélium. À gauche : Herschel étudiera les sites de formation d'étoiles dans une gamme d'énergie inexplorée (image de Rho Ophucius vue par le satellite ISO).

ESA

Le cryostat d'Herschel contient 2 500 litres d'Hélium, ce qui assure à la mission une autonomie d'environ 3 ans. Il maintient l'ensemble du plan focal à une température de -271°C. Le télescope est, quant à lui, refroidi passivement à -200 °C grâce à une protection thermique.

Défis technologiques en chaîne

La contribution matérielle du CEA a été particulièrement significative concernant le spectro-imageur PACS. D'abord, par une implication pluristructurelle incluant l'Institut nanosciences et cryogénie (Inac) et l'Institut de recherches sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu), tous deux faisant partie de la Direction des sciences de la matière, avec le Laboratoire d'électronique et de technologies de l'information (Leti) de la Direction de la recherche technologique. Ensuite, parce que cette coopération a permis de réaliser une caméra complète, incluant les détecteurs, le **cryoréfrigérateur** 0,3 **K**, la mécanique et l'électronique nécessaire au pilotage ainsi qu'à l'acquisition des données et, bien sûr, les matrices de bolomètres spécialement développées pour les besoins de la mission.

Aujourd'hui, les équipes du CEA ont maîtrisé la réalisation de plans focaux de plusieurs milliers de **pixels** par des procédés de fabrication collective, dérivés de la micro-technologie du silicium développée par le Leti. Il s'agit d'un bond technologique comparé à l'offre des autres laboratoires se contentant seulement de quelques dizaines voire de quelques centaines de détecteurs. Leur limitation résulte des dispositifs mis en place pour capter le rayonnement : cornets en face de chaque détecteur, sphères intégrantes, assemblage manuel de chaque pixel, etc. Nos avancées ont bénéficié du contexte exceptionnel des années 1990, marquées par l'essor de la micro-électronique, notamment avec l'avènement de puces capables de contenir différents types de capteurs obtenus par gravure profonde et collective du silicium (micro-accéléromètres pour les *airbags* équipant les véhicules automobiles, détecteurs de méthane destinés à l'habitat…). À cet élan technologique s'ajoutait une circulation de l'information plus détendue que celle qui avait été en vigueur au cours des années précédentes : des idées anciennes concernant l'absorption des ondes **électromagnétiques** sont redevenues au goût du jour. Elles ont été adaptées au problème de la détection par les équipes du Leti pour être compatibles avec les procédés de fabrication collective. Plus rien ne s'opposait à la réalisation de grandes matrices de détecteurs.

Reste, pour les chercheurs, à relever un autre défi, celui de faire en sorte que la sensibilité des nouveaux détecteurs ne soit plus limitée que par les fluctuations de rayonnement émanant du miroir du télescope (pourtant refroidi à près de -200 °C). Jusqu'à présent, les détecteurs nus dont la surface n'atteint pas le mm^2, pouvaient déjà distinguer l'équivalent d'une ampoule électrique de 100 Watt située à 300 km de là. Avec le télescope Herschel, l'observatoire fera bien mieux en détectant une source analogue mais placée, cette fois, à la distance de la Lune ! Parvenir à une telle performance suppose de refroidir chaque bolomètre, véritable détecteur thermique de rayonnement, à une température bien plus basse que celle de l'instrument, soit 0,3 Kelvin. Pour atteindre cette température dans l'espace, les chercheurs recourent à des cryoréfrigérateurs à évaporation d'hélium (^{3}He) en circuit fermé, développés par le Service des basses températures (SBT) du CEA. La principale difficulté soulevée par ce type de système réside dans le « budget » de puissance totale disponible sur le plan focal, à savoir 10 µ**W** – puissance indispensable pour la polarisation, la lecture, les connexions électriques et mécaniques des détecteurs. La mise au point d'un **multiplexage** astucieux a permis aux chercheurs de mettre en œuvre 2 560 bolomètres opérationnels sur la caméra de PACS, dans ce « budget » de puissance, alors que l'instrument SPIRE, de facture plus classique bien que pourvu du même cryoréfrigérateur, n'en pilote que 300 !

F. Vigouroux/CEA

Il faut travailler sur la problématique du refroidissement des détecteurs embarqués sur les satellites, pour que ceux-ci marchent parfaitement durant au moins dix ans. Les cryoréfrigérateurs refroidissent les détecteurs à quelques centaines de millikelvins. Ici, essais thermiques sur le cryoréfrigérateur de rechange du satellite Herschel.

Ces détecteurs se répartissent en deux plans focaux dans les gammes respectives de 60 à 130 µm et 130 à 210 µm. Dans la caméra, leur distribution permet de cartographier la même zone du ciel mais à des longueurs d'onde différentes. À plus courte longueur d'onde, la complexité du plan focal s'établit à 64 x 32 pixels, ce qui permet de bénéficier au mieux de la résolution du grand miroir d'Herschel ; en revanche, une complexité de 32 x 16 pixels suffit aux plus grandes longueurs d'onde. Chaque plan focal est formé de modules 16 x 16 pixels « aboutables » sur trois côtés. Et comme les détecteurs présentent une large bande spectrale d'absorption, le montage des modules s'opère indifféremment sur l'une ou l'autre des voies optiques. Seuls les filtres optiques placés devant chaque plan focal définissent alors la gamme de longueurs d'onde. Chaque pixel du module correspond à un bolomètre silicium préalablement hybridé, au moyen d'une bille en indium, à un circuit de lecture et de multiplexage en technologie CMOS (pour *Complementary Metal Oxide Semiconductor*)[1]. L'opération d'hybridation conduit à trois fonctionnalités :

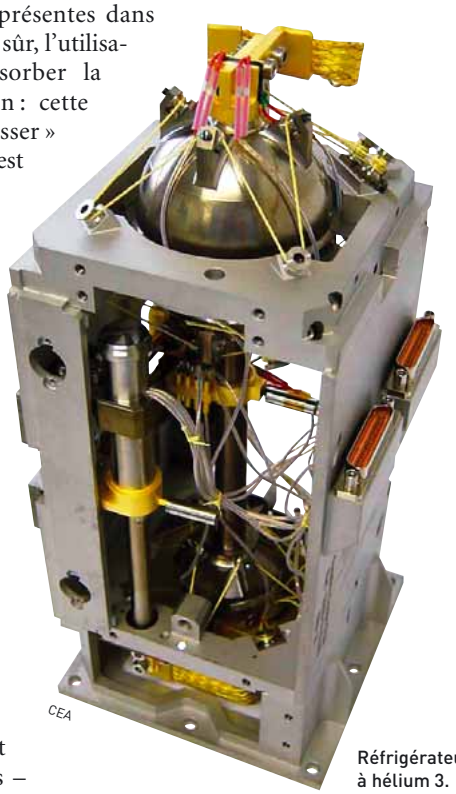
- l'interconnexion électrique habituelle du bolomètre au circuit de lecture ;
- la réalisation d'une cavité optique pour piéger efficacement la lumière incidente ;
- la tenue mécanique et la thermalisation du bolomètre.

La taille des billes d'hybridation a été calculée pour que la cavité résonnante s'accorde à la longueur d'onde à absorber. Cette cavité comprend la grille bolométrique ainsi qu'un réflecteur situé sur le circuit CMOS : elle favorise l'absorption maximale de l'onde incidente, proche de l'unité. L'absorption s'effectue dans un métal déposé sur la grille et dont l'impédance de surface est adaptée à celle du vide.

(1) Succédant aux transistors bipolaires, la technologie CMOS consiste à fabriquer des composants électroniques à faible consommation électrique dédiés à la conception des processeurs.

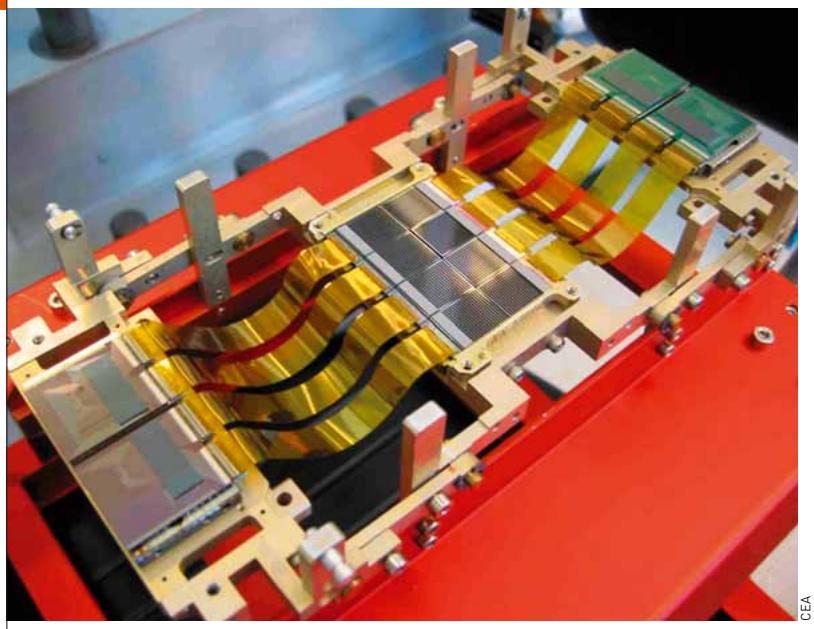
Quant à la grille bolométrique en silicium, elle se trouve suspendue par des poutres très fines ($\approx$ 2 µm) et faiblement conductrices de la chaleur. Ce dispositif permet au rayonnement ténu absorbé d'induire une élévation mesurable de sa température. Enfin, un thermomètre en silicium dopé, situé au centre de la grille, réalise la mesure en exploitant une loi exponentielle de la résistance avec la température. Il révèle un cœfficient de température de près de 3 000 %/K. Comparée à une surface « pleine », la grille présente un double avantage : d'abord, celui de posséder une masse calorifique plus faible garantissant une vitesse de réponse thermique ; ensuite, celui d'offrir une moindre susceptibilité aux particules cosmiques ionisantes présentes dans l'environnement spatial. Bien sûr, l'utilisation d'une grille pour absorber la lumière peut poser question : cette lumière n'allait-elle pas « passer » par les trous de la grille ? Ce n'est pas le cas pour la bonne raison que la lumière ne « distingue » pas les détails inférieurs à sa longueur d'onde. Il suffit donc de fabriquer une grille d'un pas inférieur à la longueur d'onde à détecter.

Concernant les modules 16 x 16, chacun d'entre eux fut évalué individuellement lors de campagnes de tests réalisées entre 2003 et 2005. Au vu des performances, ils ont été intégrés dans les plans focaux et étalonnés une première fois. Ensuite, une fois la caméra complète intégrée dans l'instrument PACS – cryoréfrigérateur et l'électronique de vol compris –



CEA

Réfrigérateur à hélium 3.



CEA

Un des plans focaux bolométriques (32 x 64 pixels) équipant l'instrument PACS.

un étalonnage final a pu être opéré en deux étapes : la première, réalisée sur le centre du CEA de Saclay, en 2006, et la seconde, à Garching (Allemagne), l'année suivante. Au début de l'année 2008, ce fut au tour de l'instrument PACS de prendre place à bord du satellite Herschel avec SPIRE et HIFI (pour *Heterodyne Instrument for Far-Infrared*). Les derniers ajustements réalisés (changement des connecteurs défaillants du satellite, re-routage des câbles pour éviter les perturbations dues aux panneaux solaires…), le satellite fut déclaré « bon pour le service » en décembre 2008.

Perspectives

Actuellement, les équipes ayant développé cette caméra submillimétrique tendent leurs efforts vers deux directions.

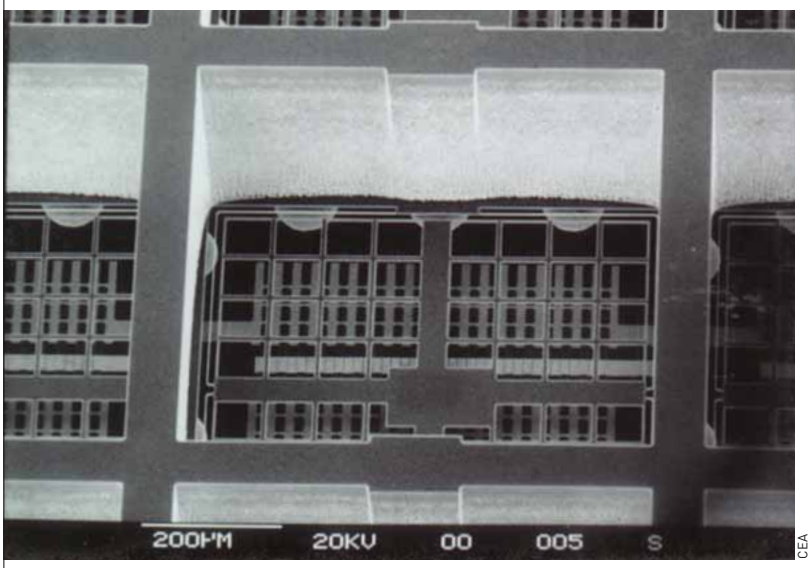
• La première consiste à pousser les matrices de bolomètres de PACS vers les plus grandes longueurs d'onde afin de les installer sur de grands télescopes au sol. L'opération nécessite l'adaptation préalable de ces matrices aux différentes « fenêtres » atmosphériques, c'est-à-dire aux différentes bandes spectrales étroites où l'atmosphère (en altitude) n'est pas totalement opaque (200, 350, 450 et 865 μm). L'intérêt de ce travail ne réside pas tant dans la sensibilité des mesures (impossible de rivaliser avec le spatial !) que dans l'utilisation de très grands télescopes (12 à 15 mètres de diamètre) capables d'offrir des pouvoirs séparateurs bien plus importants. Leur adaptation aux plus grandes longueurs d'onde se fera surtout par l'augmentation de la taille des billes d'hybridation.

• L'autre voie concerne le développement de détecteurs beaucoup plus sensibles destinés aux futures missions spatiales.

Aujourd'hui, deux projets bénéficient déjà de ces développements. Il s'agit d'ArTeMiS (pour Architecture de bolomètres pour des télescopes submillimétriques au sol), une caméra bolométrique de 5 000 pixels destinée au télescope APEX (pour *Atacama Pathfinder Experiment*), installé au Chili, et de PILOT (pour *Polarized Instrument for Long wavelenght Observation of the Tenous interstelar medium*), expérience dotée de deux plans focaux, montés dans une caméra embarquée sous ballon, pour mesurer l'émission polarisée du rayonnement en provenance de la **Voie lactée**.

Enfin, l'optimisation du bolomètre devrait également pouvoir servir à diverses applications à très faible flux de fond. C'est le cas de SPICA (pour *Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics*), mission spatiale conduite par l'**Agence japonaise** (**JAXA**) en collaboration avec l'**Agence spatiale européenne** (**ESA**), dont le lancement interviendra à l'horizon 2018. Ce télescope spatial utilisera le même miroir qu'Herschel mais refroidi à -268 °C ! Pour optimiser au maximum cette nouvelle configuration, les chercheurs devront augmenter la sensibilité des détecteurs d'un facteur 100 au minimum. Pour atteindre une telle sensibilité (puissance de bruit de 10^{-18} watts), le refroidissement du bolomètre silicium sera abaissé jusqu'à 0,05 Kelvin.

Afin de répondre aux défis lancés par cette nouvelle mission, le CEA s'est engagé dans une phase d'études préliminaires. Par exemple, les chercheurs du SBT travaillent déjà à la conception d'un cryoréfrigérateur à désaimantation **adiabatique** pour l'espace. SPICA devrait ouvrir la voie à d'autres projets passionnants comme les expériences FIRI (pour Interférométrie bolométrique dans l'espace) ou BPOL (pour Mesure de la **polarisation** du fond cosmologique à 3 K).



CEA

Photographie au microscope électronique à balayage d'un pixel bolomètre.

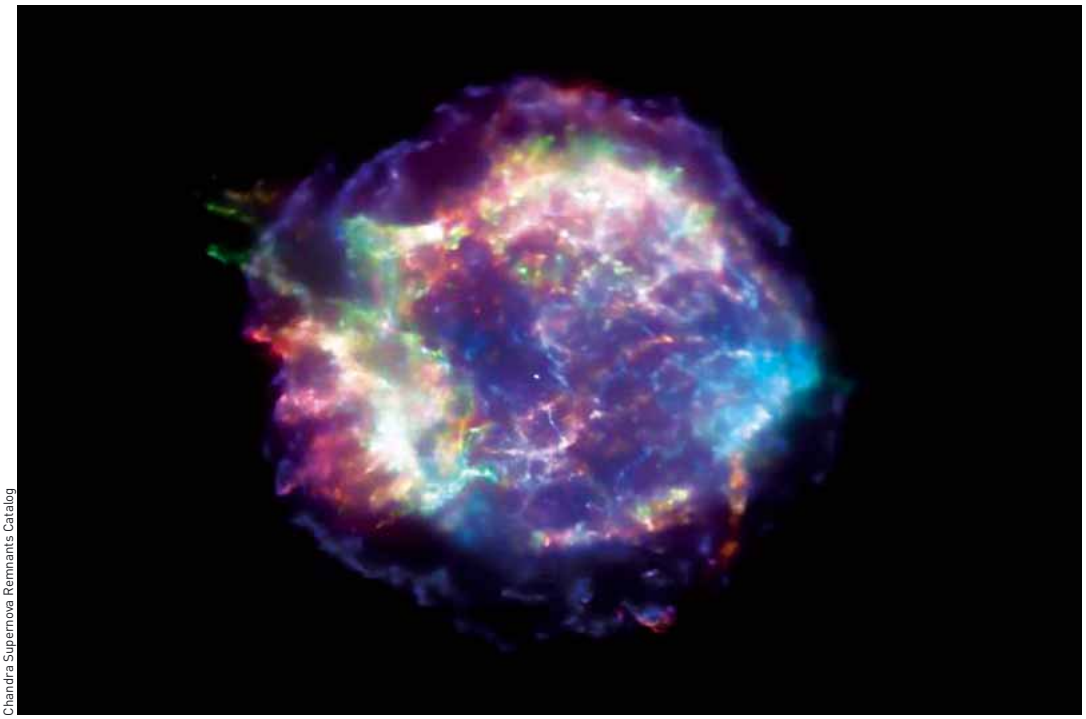
> Patrick Agnese
Département d'optronique
Laboratoire d'électronique
et de technologies de l'information (Leti)
Direction de la recherche technologique (DRT)
CEA Centre de Grenoble

> Louis Rodriguez
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles
(CEA-Université de Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

L'univers des rayons X

S'il doit exister un observatoire pour nous éclairer sur l'astronomie des rayons X dans l'Univers, sans nul doute s'agit-il d'IXO. L'intérêt des chercheurs pour ce rayonnement s'explique parce que la plupart des sources astrophysiques émettent, peu ou prou, en rayons X et que ces derniers sont une véritable mine de renseignements scientifiques sur ces sources, constituant ainsi un merveilleux outil d'observation.

L'atout d'IXO (pour International *X-ray Observatory* : voir encadré) réside dans sa capacité d'observer sur une très longue durée dans un environnement extrêmement stable. Pour mener à bien sa mission, il emportera un spectro-imageur à base de matrices de micro-calorimètres, possédant la meilleure résolution spectrale jamais atteinte par un spectromètre dispersif en énergie, de 2 **eV** pour des photons X de 6 keV.

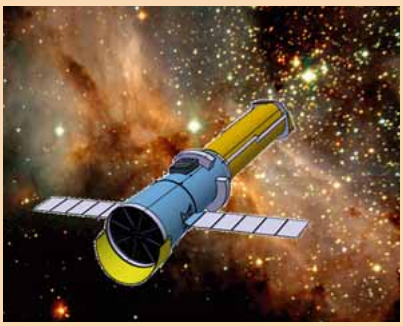


Chandra Supernova Remnants Catalog

Reste de la supernova (étoile qui explose en fin de vie) Cassiopée A. L'image en rayons X, obtenue par le satellite Chandra, montre en fausses couleurs l'expansion d'une bulle de gaz à plusieurs millions de degrés à l'intérieur d'une enveloppe d'électrons extrêmement énergétiques.

Dans les lumières d'IXO

IXO est le projet phare de l'astronomie des rayons X en ce début de siècle. Ce projet est né de la fusion de deux grands projets. L'un américain, Constellation-X, qui devait être une batterie de quatre sondes observant simultanément la même région du ciel et l'autre européen, XEUS (pour *X-ray Evolving Universe Spectroscopy*). Celui-ci était constitué de deux sondes, l'une « miroir » et l'autre « détecteur », volant en tandem à la précision de quelques millimètres dans les trois dimensions. Essentiellement pour des raisons de coût, les deux projets sont en cours de fusion depuis août 2008. Le nouveau projet envisagé consiste en un satellite déployable. C'est-à-dire qu'il partira dans la coiffe de la fusée, replié, et qu'une fois dans l'espace, un mécanisme permettra de l'étendre jusqu'à une dizaine de mètres de distance focale (un peu à la manière d'une longue-vue de marine). Par ailleurs, le miroir de ce télescope sera d'un type tout à fait révolutionnaire. Jusqu'à maintenant, presque tous les observatoires spatiaux en rayons X ont utilisé la technique des coquilles métalliques à symétrie cylindrique enchâssées l'une dans l'autre pour ces miroirs à incidence rasante. La technique proposée pour le très grand miroir d'IXO sera basée sur les développements des technologies du silicium. L'élément de base de ce miroir est constitué de silicium cannelé et cintré. Chaque élément est collé à son voisin pour former une structure ressemblant à une galette de microcanaux. L'avantage énorme de cette technologie réside tant dans sa légèreté que dans la rigidité de l'ensemble, ce qui rend le miroir très attrayant pour partir en fusée. Cet observatoire sera placé au **point de Lagrange L2** du système **Soleil**-Terre, ce qui permettra des observations de très longue durée (quasiment sans éclipse) dans un environnement extrêmement stable.

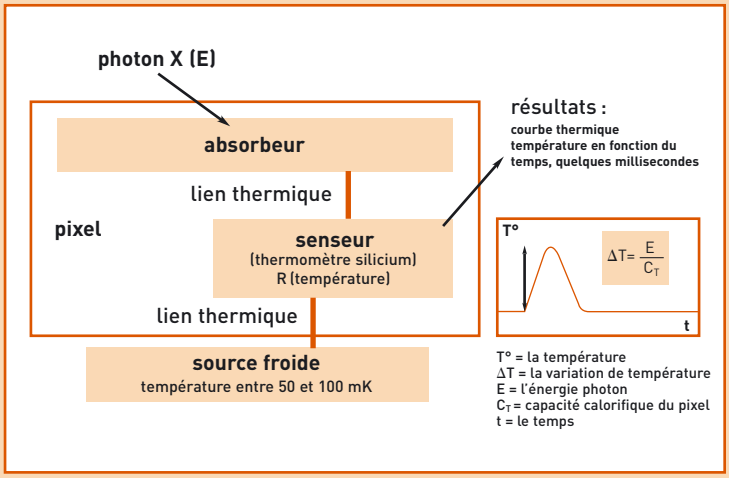


J-L Sauvageot/CEA

Vue d'artiste d'IXO.

Principe du microcalorimètre X

Réaliser la mesure calorimétrique d'un seul **photon** X suppose de prendre en compte deux notions majeures :
1- La propriété de la grande majorité des matériaux d'avoir une capacité calorifique spécifique dont la valeur diminue avec la température. Cela permet d'obtenir une élévation de température non négligeable avec la seule énergie d'un photon X dissipée dans un **pixel** détecteur, sous réserve qu'il soit de petite dimension (d'où le terme de microcalorimètre) et, surtout, maintenu à basse température (de l'ordre de 0,05 **K**).
2- L'existence de senseurs (thermomètres) suffisamment sensibles à ces très basses températures, pour mesurer une élévation de température (quelques microkelvins).
Les thermomètres le plus souvent utilisés délivrent un signal électrique sous forme d'une tension (senseur semi-conducteur, silicium ou **germanium**) ou d'un courant (senseur à transition supraconductrice) proportionnel à la température. La mesure de la courbe temporelle (pulse induit par le dépôt d'énergie du photon X) permet de déterminer l'énergie déposée avec une excellente **résolution** spectrale.



Structure d'un pixel microcalorimètre.
Une impédance thermique entre l'absorbeur et le senseur favorise une thermalisation complète de l'énergie dans l'absorbeur avant que la chaleur correspondante ne soit transmise au senseur. Ensuite, la chaleur évacuée lentement vers la source froide mettra le pixel à un niveau qui le rendra sensible au rayon X incident. Entre temps, sera réalisée la mesure fine de la courbe de température, associée par le thermomètre.

Le rayonnement X comme traceur

La quasi-totalité des sources astrophysiques émettent des **rayons X** et certaines n'émettent d'ailleurs que des rayons X. À ces énergies (l'usage veut que l'on s'exprime en énergie pour traiter du rayonnement X), les **photons** se font pénétrants et donc capables de ramener des informations précieuses, notamment sur les processus enfouis au sein des nuages de matière. Le **rayonnement** X fait donc office de traceur, à la fois pour la matière à très haute température (quelques millions de degrés), et pour les **électrons** à haute énergie en interaction avec un **champ magnétique** ou des photons de basse énergie. La matière peut être portée à ces hautes températures par les potentiels de gravitation intenses au sein des **amas de galaxies**, auprès des objets compacts massifs ou encore à l'occasion d'explosions stellaires. En collectant et détectant le rayonnement X, les chercheurs ouvrent une nouvelle fenêtre donnant sur l'Univers « violent ». Parmi les atouts des rayons X, celui d'être réfléchis sous incidence rasante permet l'utilisation de télescopes à miroir. L'interaction des rayons X avec le milieu détecteur, relativement ponctuelle, débouche sur une imagerie à haute **résolution angulaire**. Il n'en va pas ainsi dans le domaine gamma à plus haute énergie où les optiques par réflexion deviennent inopérantes, faisant que les collimateurs n'autorisent qu'une imagerie à basse résolution angulaire. Quant au dépôt d'énergie d'un photon, essentiellement obtenu par effet photoélectrique, il tient dans un pixel situé à l'intérieur d'un détecteur matriciel de taille raisonnable. Pour toutes ces raisons, la **spectrométrie dispersive en énergie** à haute efficacité **quantique** devient aujourd'hui envisageable pour chaque photon absorbé. Il s'agit d'une avancée notable comparée aux résultats de la spectrométrie dispersive en longueur d'**onde**. Obtenue, à plus grande longueur d'onde, au moyen de dispositifs optiques comme les réseaux, il s'agissait d'une technique très « dépensière » en photons.
Pour les astrophysiciens, l'observation des **raies** de fluorescence X et du *continuum* (émis thermiquement ou par les électrons en interaction avec le **champ magnétique** ou les photons) ouvre une mine d'informations inédites sur la composition, la densité, la température et la dynamique de la matière à très haute température, mais aussi sur le champ magnétique local. Encore faut-il, à ces astrophysiciens, pouvoir disposer d'une plate-forme spatiale équipée d'un instrument spectro-imageur performant, les rayons X étant arrêtés par l'atmosphère !

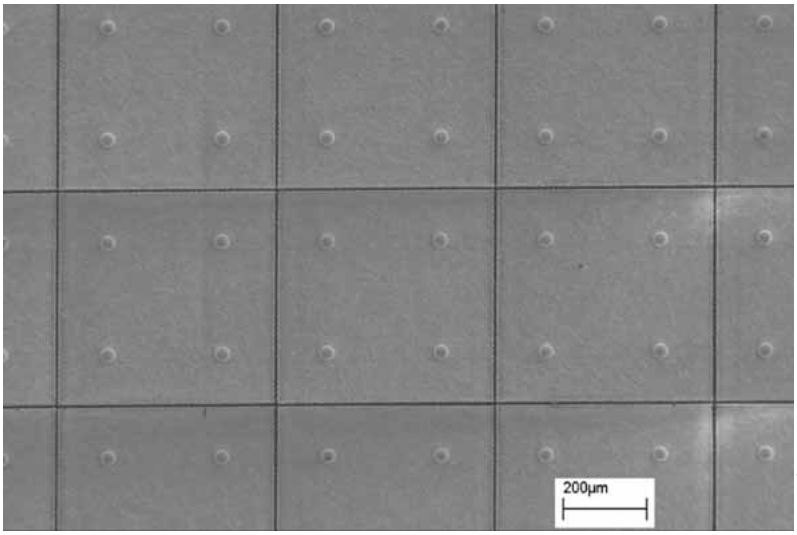
Un savoir-faire virtuose

Lancés en 1999, deux télescopes dédiés à l'astronomie X sont actuellement satellisés en orbite terrestre. Il s'agit de XMM-Newton (pour *X-Ray Multi Mirror*) et de Chandra[1]. L'un et l'autre sont équipés de spectro-imageurs à base de CCD (pour *Charge-Coupled Device*), c'est-à-dire de dispositifs à transfert de charge en silicium. Dans leurs détecteurs semi-conducteurs, l'énergie déposée par un photon X se mesure en inventoriant les **paires électrons-trou** créées. La difficulté réside dans le fait que l'énergie de ce photon X est aussi dissipée en chaleur, qui entre en compétition avec la production des paires d'électrons-trou. Dès lors, la quantité d'énergie mesurée fluctue d'un photon X absorbé à l'autre et cela, à énergie incidente équivalente. La résolution spectrale obtenue ne peut alors être meilleure qu'une valeur plancher (120 eV @ 6 keV). Les chercheurs rencontrent là une limite intrinsèque au milieu détecteur (ici, le silicium) et à ce mode de détermination de l'énergie (comptage des paires d'électrons-trou) à laquelle ils ne pourront jamais remédier. Pour que ces fluctuations ne fassent pas obstacle à la réalisation des mesures, la totalité de l'énergie doit se retrouver préalablement sous forme de chaleur et ainsi permettre la mesure de la température associée (c'est de la calorimétrie). Une coopération a été organisée, au sein du CEA, entre le Laboratoire d'électronique et de technologies de l'information (Leti) et l'Institut de

(1) Du nom de l'astrophysicien américain d'origine indienne disparu, en 1995, Subrahmanyan Chandrasekhar.

recherche fondamentale sur les lois de l'Univers (Irfu). Pour ces équipes, il s'agit de développer des matrices de microcalorimètre (voir encadré) en vue d'améliorer la résolution spectrale d'un ou deux ordres de grandeur et ainsi dépasser les détecteurs semi-conducteurs. L'expérience acquise dans le domaine **infrarouge** et **submillimétrique** grâce aux matrices de micro**bolomètres** (dans ce domaine de longueur d'onde, il s'agit de la mesure d'un flux) s'est avérée d'autant plus efficace que de nombreuses technologies silicium, déjà utilisées par l'instrument PACS (pour *Photo detector Array Camera and Spectrometer*) se trouvent directement transposables sur les matrices de microcalorimètres. Cette R&D vise à construire des matrices de grande taille (32 x 32 pixels), selon une conception du **pixel** capable d'intégrer les spécifications contraignantes de l'astronomie X (voir encadré *Les lumières d'IXO*). La réalisation des pixels microcalorimétriques (500 x 500 µm^2) par micro-usinage dans une plaque de silicium sur isolant (SOI) appelle un savoir-faire virtuose. Les résultats montrent des senseurs extrêmement fins (moins de 1,5 µm d'épaisseur) reliés à la source froide au moyen de poutres de silicium dont la section ne dépasse pas les quelques microns carrés. Autant de performances compatibles avec l'exigence de solidité puisque les senseurs supportent leur assemblage par hybridation, au moyen de billes d'indium, avec des absorbeurs constitués de minces feuilles de tantale. Par ailleurs, il a fallu toute l'expertise du Leti pour réussir l'intégration du thermomètre dans la plaque suspendue. En effet, cet instrument comportant une résistance variable en fonction de la température (de l'ordre du mégohm à 50 mK), le contrôle d'un haut niveau de dopage (à une fraction de pour-cent près) s'imposait, avant de l'homogénéiser par un traitement à haute température. Cette technique de fabrication a permis la réalisation de thermomètres enfin capables d'atteindre les performances requises.

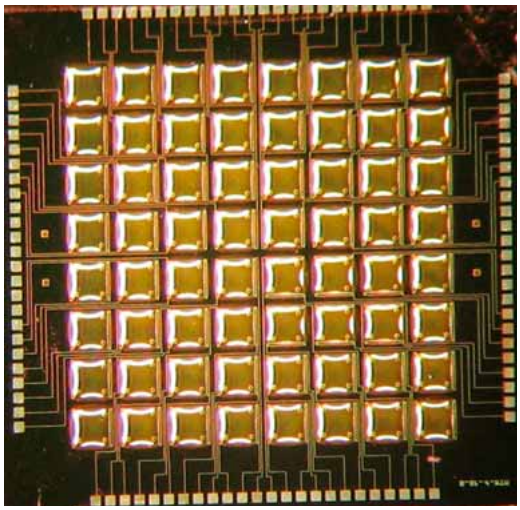
Restait encore à traiter la question des matrices de grande taille. Jusqu'à présent, celles de petite dimension se fabriquaient par assemblage manuel des absorbeurs avec les senseurs, opération réalisée sous microscope. Or, cette technique ne convient pas aux matrices de grande taille. D'où l'idée d'une matrice prototype de 64 pixels hybridés, extrapolable à de plus grandes tailles, que le Leti a réalisée grâce à une technologie de report (absorbeur sur senseur) non plus manuelle mais collective.



A. Aliane/CEA

Matrice d'absorbeur en tantale.

Néanmoins, un obstacle de taille empêche encore la réalisation d'un plan focal à partir d'une mosaïque constituée avec ce type de matrices, à savoir l'inexistence d'une électronique de proximité fonctionnant à basse température. Indispensable à la lecture et au **multiplexage**, cette électronique doit être cryogénique pour trouver sa place dans le cryostat au plus près du détecteur, position qui présente une multitude d'avantages : simplicité, fiabilité, immunité au bruit, augmentation de la bande passante, réduction de la puissance parasite sur les cryoréfrigérateurs de vol (aux performances obligatoirement limitées). Dans cette optique, les chercheurs explorent aujourd'hui des voies originales comme les Transistors à haute mobilité électronique (HEMTs) en GaAlAs/GaAs (arséniure de galium et arséniure de galium-aluminium) ou les ASICs (pour *Application-Specific Integrated circuit*) en silicium-**germanium**. Ces avancées bénéficieront incontestablement à l'amélioration des performances des futurs observatoires dédiés à l'astronomie X, leur surface effective ou leur résolution spectrale notamment. Les chercheurs en sont persuadés : de nouvelles découvertes astrophysiques, aujourd'hui encore imprévisibles, en résulteront.



A. Aliane/CEA

Matrice senseur

> Patrick Agnese
Département d'optronique
Laboratoire d'électronique
et de technologies de l'information (Leti)
Direction de la recherche technologique (DRT)
CEA Centre de Grenoble

> Claude Pigot
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles
(CEA-Université de Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Des cryoréfrigérateurs pour l'espace

À l'environnement spatial correspondent des contraintes spécifiques dont la résistance mécanique liée au décollage, l'absence de gravité, la plus critique d'entre toutes concernant la fiabilité d'instruments prévus pour fonctionner 5 à 10 ans sans panne. La solution viendrait de systèmes dotés de pièces mobiles sans frottement, voire dépourvus de pièces en mouvement.

L. Vigouroux/CEA

Installation d'un cryoréfrigérateur de vol sur le cryostat de test.

Comment obtenir des températures cryogéniques dans l'espace ? Le moyen le plus simple consiste à profiter des ressources naturelles disponibles – par exemple, celles offertes par le vide quasi parfait de l'Univers et le « fond » froid du ciel. L'absence de matière (notamment de gaz) limite les échanges de chaleur aux seuls transferts **radiatifs**. Dès lors, en se positionnant face au fond noir du ciel qui rayonne à environ 2,7 **K**, il s'avère théoriquement possible de refroidir une surface jusqu'à des températures de seulement quelques kelvins[1]. Dommage qu'en pratique, la méthode ne vaille que pour des orbites particulières – les meilleurs systèmes, appelés **radiateurs passifs**, ne permettant pas d'atteindre des températures inférieures à 30 ou 40 K. Une autre solution consiste à prendre un liquide cryogénique, préalablement liquéfié sur terre et stocké dans un réservoir appelé cryostat, puis de profiter du vide intersidéral pour obtenir un refroidissement par évaporation. Cette technique permet d'atteindre des températures de 1,5 K en utilisant de l'**hélium** – l'obtention de températures inférieures nécessitant de passer par d'autres solutions technologiques.

(1) La correspondance entre l'échelle en kelvin (K) avec les degrés Celsius est facile : l'échelle de kelvin prend son origine au zéro absolu (-273,15 °C) et 1 K vaut donc 1 °C.

Du cryostat au cryoréfrigérateur

Pourtant, les orientations actuelles de la cryogénie spatiale privilégient la suppression de cryostats au profit de systèmes, appelés **cryoréfrigérateurs**, conçus pour refroidir jusqu'aux températures cryogéniques (en dessous de 120 K). En effet, bien que l'utilisation de cryostats soit une technique simple et offrant de multiples avantages, celle-ci n'en présente pas moins deux inconvénients majeurs : une masse et un volume importants qui limitent la durée de mission en raison de l'assèchement du réservoir. En revanche, les cryoréfrigérateurs peuvent fonctionner quasi indéfiniment car leur source électrique s'alimente grâce à l'énergie **photovoltaïque** disponible dans l'espace, ce dont bénéficient déjà presque toutes les missions spatiales.

Le SBT, notamment le Laboratoire cryoréfrigérateurs et cryogénie spatiale, développe depuis plusieurs

années des systèmes de refroidissement adaptés aux différentes contraintes spatiales. Pour les froids extrêmes, la solution consiste à associer plusieurs cryoréfrigérateurs en cascade pour couvrir l'intégralité de la gamme des températures. Ces chaînes cryogéniques peuvent atteindre des températures de 20 mK (-273,13 °C). Actuellement, trois technologies émergent pour obtenir le refroidissement d'un composant destiné à une application spatiale, et à des températures inférieures à 1 K (-272,15 °C) :

- le refroidissement par évaporation utilisant un **isotope** de l'hélium (l'hélium 3) ;
- le refroidissement magnétique par désaimantation **adiabatique** ;
- la dilution, c'est-à-dire les propriétés des deux **isotopes** de l'hélium.

Les équipes du SBT développent toutes ces techniques. La première d'entre elles leur a valu une réputation mondiale depuis son utilisation par les instruments SPIRE (pour *Spectral and Photometric Imaging Receiver*) et PACS (pour *Photo detector Array Camera and Spectrometer*) embarqués sur le satellite Herschel. Pour comprendre le principe du cryoréfrigérateur, il faut savoir que le refroidissement par évaporation répond au même mécanisme physique que la transpiration. Pour l'eau, le passage de l'état liquide à l'état de vapeur requiert de l'énergie ; mais en l'absence de toute source de production extérieure d'énergie, la solution pour en obtenir consiste à ponctionner directement sur l'agitation thermique des **atomes**. Par conséquent, il devient alors possible de procéder au refroidissement. Cette propriété vaut pour tous les fluides ou presque, même la transpiration procède de la sorte pour réguler la température corporelle. Pour l'hélium 3, elle permet d'atteindre des températures de -272,85 °C (300 mK). En revanche, l'hélium 3 ne peut couvrir seul l'intégralité de la gamme depuis la température ambiante. Aussi, pour les besoins de la mission Herschel, a-t-il fallu lui associer de l'hélium 4 (un énorme réservoir d'environ 2 500 litres) indispensable pour obtenir une température d'environ 2 K. Concernant les basses températures, il faut souligner que les avancées ne s'apprécient pas en termes de différence mais plutôt de rapport. En l'occurrence, refroidir de 2 K à 300 mK (rapport 7) s'avère pratiquement aussi difficile que de passer de la température ambiante (293 K) à -230 °C (42 K).

Pour optimiser le taux d'évaporation, les chercheurs procèdent par pompage et, pour gagner en fiabilité, s'appuient sur les propriétés d'adsorption des **charbons actifs**, ce qui leur évite l'emploi de pièces mobiles. Il faut dire que ce matériau offre une surface importante ($\approx$ 1 200 m^2/gr) qui, une fois refroidie, « piège » les **molécules** de gaz puis, à l'inverse, les « relâche » lorsqu'elles se trouvent chauffées (phénomène d'adsorption physique lié aux **forces de Van der Walls**). Les températures d'**adsorption** et de désorption dépendent alors de la nature du gaz. Dans le cas de l'hélium, en chauffant le charbon actif à -230 °C (45 K), puis en le refroidissant à -270 °C (3 K), il devient possible d'obtenir les pressions nécessaires à la condensation du liquide, puis à son pompage. Ainsi peut-on alors abaisser la pression et donc la température (figure 1). Entièrement statique, ce processus se révèle très efficace en matière d'amplitude de pression. Dans le cas présent, il permet d'obtenir un taux de compression/détente de six ordres de grandeur (10^6), ce qui n'a pas d'équivalent avec des systèmes mécaniques.

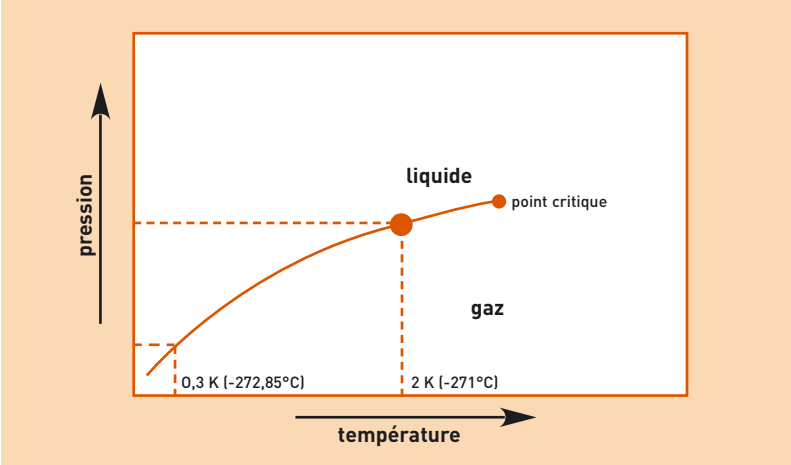
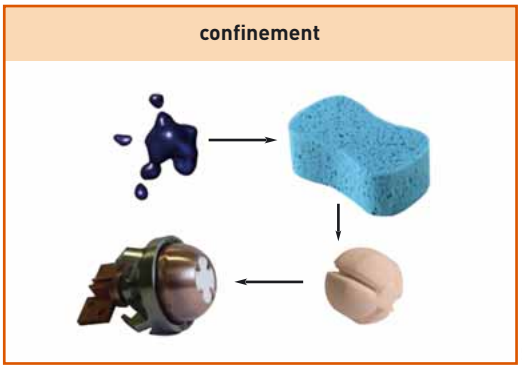


Figure 1.
Diagramme de phase de l'hélium 3 avec point extrême du cycle pour le liquide.

Un liquide sans gravité

Envoyer des instruments dans l'espace suppose encore de résoudre la question de l'apesanteur. La gestion du liquide se règle par un confinement capillaire au sein d'un matériau poreux jouant le rôle d'éponge. Composé d'une mousse d'alumine, ce matériau présente une porosité ouverte, c'est-à-dire que chaque petite cavité communique avec ses voisines, laissant au liquide la possibilité de se déplacer, et au gaz celle d'être pompé. Le cycle **thermodynamique** ici en vigueur suppose de pouvoir contrôler les gradients thermiques dans le système, c'est-à-dire de maîtriser la répartition des températures. Là encore, le moyen d'y parvenir passe par une technique exempte de toute pièce mobile, à savoir celle des interrupteurs thermiques à gaz d'échange. Dans les systèmes cryogéniques, leur rôle équivaut à celui des interrupteurs électriques : mise en contact thermique de deux composants (écoulement de chaleur) ou, au contraire, isolement de l'un avec l'autre. Le basculement entre la position fermée (*On*) ou ouverte (*Off*) repose sur la présence, ou l'absence, de gaz entre deux pièces concentriques. La gestion du gaz s'opère au moyen d'une minipompe à adsorption, exempte de toute pièce mobile.



CEA

Principe du confinement capillaire.
L'évaporateur (demi-sphère de titane visible sur la photographie) contient un matériau poreux jouant le rôle d'une éponge.

Essais vibratoires au Centre spatial de Liège. Installation d'un modèle de vol sur la table vibrante.

L. Duband/CEA

Décollage et résistance mécanique

Enfin, parmi les ultimes contraintes liées à l'envoi d'instruments dans l'espace, mais non des moindres, figurent encore l'isolation thermique nécessaire à l'obtention des très basses températures et la tenue mécanique requise pour résister à un décollage de fusée, celui d'Ariane 5 par exemple. Pour les résoudre, les chercheurs utilisent des suspentes en **Kevlar**. Ce matériau présente le double avantage d'une faible conductivité thermique et d'une très forte résistance mécanique (deux fois la résistance d'un fil en acier de même diamètre). Que la durée de vie de ce type de cryoréfrigérateur ne soit pas limitée, *a priori*, découle directement de l'absence de pièce mobile. La preuve en est que plusieurs systèmes fonctionnent en laboratoire, depuis plus de vingt ans, sans que leurs performances s'en trouvent altérées. En effet, bien qu'utilisant de l'hélium liquide pour leur fonctionnement à basse température, ces systèmes demeurant scellés peuvent se recycler indéfiniment après l'évaporation de la dernière goutte de liquide. La limite vient seulement de la disponibilité de l'étage supérieur. Ainsi, dans le cas de Herschel, le réservoir principal devrait s'assécher après trois ans et demi de fonctionnement.

Les futures missions SPICA (pour *Space Infrared telescope for Cosmology and Astrophysics*) et IXO (pour *International X Ray Observatory*) appelleront des moyens de refroidissement visant des températures plus basses encore (50 mK). Le savoir-faire acquis dans le domaine des systèmes 300 mK à évaporation d'hélium, enrichit le développement en cours d'une architecture originale, associant un système du type d'Herschel avec un ou plusieurs étages de désaimantation adiabatique (refroidissement magnétique). Cette combinaison devrait diminuer, de manière significative, la masse du cryoréfrigérateur et donc augmenter la part de « science » embarquée. Pour ces deux futures missions, la chaîne cryogénique se composera uniquement de cryoréfrigérateurs mécaniques : d'où l'allongement possible de la durée des missions ainsi que l'optimisation de la masse « utile » embarquée. Ces avancées acquises, les chercheurs doivent encore relever plusieurs défis technologiques. Le premier d'entre eux concerne l'association d'un système de type Herschel, qui génère des pics de puissance lors des phases de recyclage, avec les étages supérieurs mécaniques qui, eux, acceptent mal ces pics. L'objectif sera donc d'imaginer et de concevoir une architecture thermique permettant de distribuer aux mieux les rejets thermiques.

CEA

Après le décollage, le satellite se retrouve dans le vide de l'espace, livré à la chaleur du Soleil. Ces conditions peuvent être testées, en salle blanche, sur des modèles d'essais.

> Lionel Duband
Service des basses températures (SBT)
Institut nanosciences et cryogénie (Inac)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Grenoble

Dans l'Univers extrême et violent

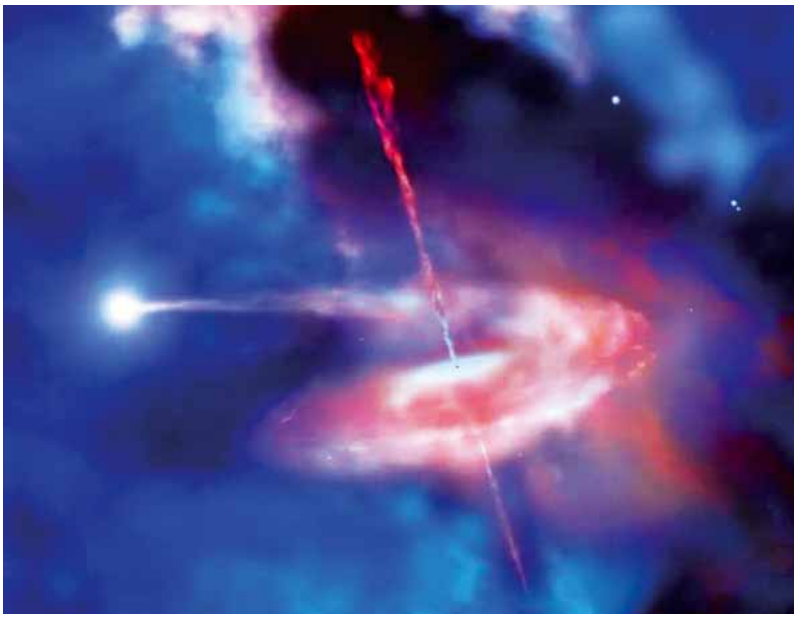
Il est une part encore secrète de l'Univers, celle où se manifestent les trous noirs et les sites d'accélération de particules du rayonnement cosmique. La connaissance de ces phénomènes, parmi les plus énergétiques de l'Univers, suppose d'explorer un domaine particulier du rayonnement cosmique : celui des rayons X durs et des rayons gamma (entre 1 keV et 1 MeV).

Dans le spectre des **rayons X durs** et **gamma**, l'exploration du ciel ne fait que commencer ! Une certitude pourtant : dans cette gamme d'énergie, l'atmosphère oppose une véritable barrière à la progression des **photons**. L'idée sera donc de lancer un télescope spatial pour observer au-delà de cette frontière et qu'il soit doté d'un spectro-imageur. Cet instrument devra détecter les photons gamma, en mesurer la direction d'origine et l'énergie, en déterminer la date d'arrivée (avec une précision d'un millionième de seconde) et si possible encore la **polarisation**. Souvent faibles, parfois lointaines et furtives, les sources recherchées exigent pour leur étude le recensement du plus grand nombre de photons possible. Aussi, les quelques grains de lumière que ces sources émettent, noyés au milieu d'un intense bruit de fond, exigent-ils des instruments d'une très grande sensibilité et de la plus haute efficacité de détection possible pour être observés. Bien que la combinaison de détecteurs performants et innovants avec des technologies spatiales ait permis des avancées spectaculaires, il n'en demeure pas moins que la détection – un par un – des photons gamma dans l'espace figure comme l'un des grands défis lancés aux astrophysiciens.

Révolution dans l'astronomie des hautes énergies

Voilà déjà une vingtaine d'années que les astrophysiciens observant dans la gamme des rayons X durs et gamma, ont troqué leurs scintillateurs pour des détecteurs plus sensibles et plus complexes à base de semi-conducteurs en silicium et en **germanium**, puis surtout en tellurure de cadmium (CdTe), excellent matériau pour la détection des photons gamma. Pour l'astronomie des hautes énergies, ce fut une révolution. En effet, grâce à leur **pixellisation**, ces instruments, véritables appareils photo numériques à rayons gamma embarqués sur des satellites, apportent une finesse d'image, une précision de datation, une sensibilité et une mesure de l'énergie de chaque photon encore jamais atteintes auparavant. Le CEA a joué un rôle majeur dans la conception de cette nouvelle génération de spectro-imageurs semi-conducteurs et dans l'optimisation de leurs performances. Le degré de précision acquis résulte de la détermination des chercheurs à protéger leurs détecteurs, de plus en plus miniaturisés et pixellisés, contre le bruit tant physique (dû aux rayons cosmiques) qu'électronique.

La première grande caméra à bénéficier des performances technologiques apportées par l'usage de détecteurs à base de tellurure de cadmium (CdTe) fut ISGRI (pour *Integral Soft Gamma-Ray Imager*) dont la surface de détection atteint un quart de mètre carré. Installée à bord du satellite INTEGRAL (pour *International Gamma Ray Astrophysics Laboratory*), il s'agit d'une mission de l'**Agence spatiale européenne** (**ESA**) lancée en 2002. Le CdTe figure parmi les matériaux les plus efficaces pour la détection des photons gamma. Cette réussite du CEA a impulsé le développement de nouveaux petits « bijoux technologiques » toujours plus performants. Ainsi, les efforts conjoints de R&D conduits par le CEA et le **Cnes** depuis ISGRI (pour *Integral Soft Gamma-Ray Imager*), garantissent aujourd'hui les performances scientifiques du futur télescope spatial ECLAIRs, dédié à la détection des sursauts gamma ou d'un télescope haute énergie de nouvelle génération du type de SIMBOL-X.



CEA

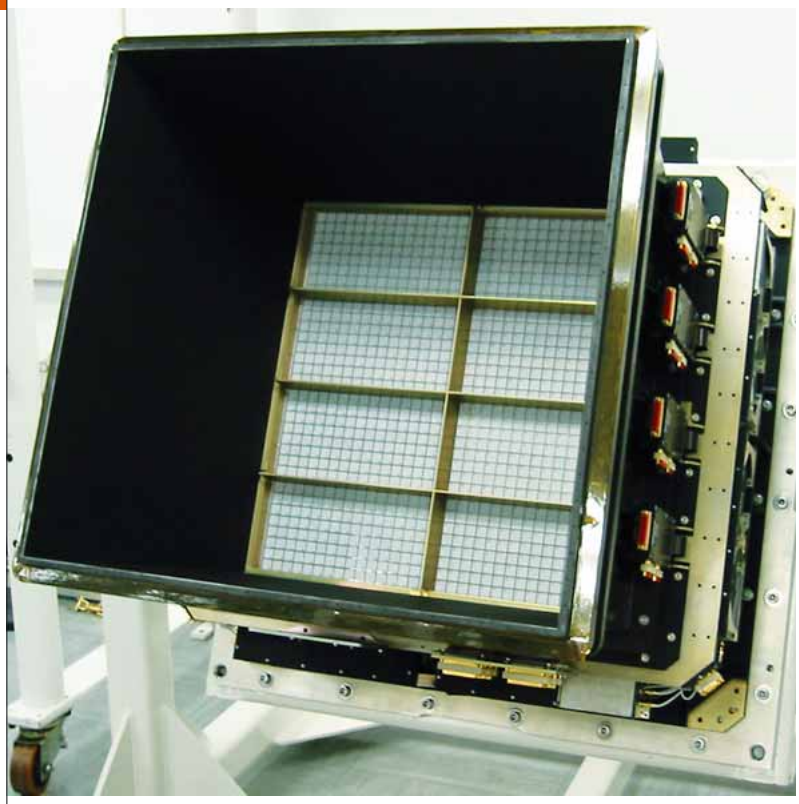
Vue d'artiste d'un trou noir accrétant la matière de son étoile compagnon dans un système binaire.

De nouveaux instruments pleins d'esprit

Pour filer la métaphore, le portrait des détecteurs de la nouvelle génération dédiés à l'astronomie X dur et gamma spatiale peut se dessiner en quatre traits :

- L'esprit leur vient d'un système de détection composé d'un senseur en CdTe et de son électronique associée placés au sein d'un module de détection miniature complexe, « spatialisable » et optimisé scientifiquement (une caméra gamma se compose d'une mosaïque de ces modules). Les progrès en détection gamma spatiale reposent donc sur des efforts simultanés consentis sur les senseurs (CdTe à électrode Schottky[1] fortement segmentée), leur

(1) L'électrode Schottky est réalisée avec un contact métal semi-conducteur formant une diode polarisée en inverse.



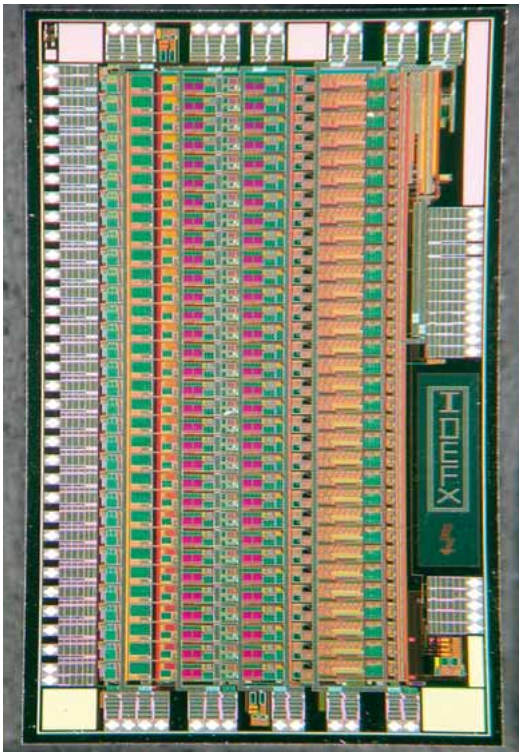
CEA

Grâce à sa caméra constituée d'une matrice de semi-conducteurs en tellurure de cadmium (CdTe), de 128 x 128 pixels, le télescope IBIS (pour *Imager on Board the Integral Satellite*), observe la voûte céleste avec une résolution angulaire d'une dizaine de minutes d'arc. La caméra ISGRI a été réalisée par le CEA avec le soutien du Cnes (photo réalisée, en 2001, à LABEN/Milan, lors de l'intégration de l'instrument).

électronique de lecture de type ASIC/CMOS (pour *Application Specific Integrated Circuit/Complementary Metal Oxide Semiconductor*) et leur assemblage en composants « hybrides ». Pour pimenter l'affaire, les différents objets doivent être compatibles avec l'environnement spatial (thermique, radiation, fiabilité...) et résistants au lancement par une fusée. Ces dernières années ont vu, à la fois, les progrès notables de l'imagerie par miniaturisation des **pixels** (500 µm de côté) et les performances spectrales. Cette double avancée a favorisé l'extension de la gamme spectrale vers les basses énergies ainsi qu'une meilleure précision dans la mesure de l'énergie de chaque photon. L'extension à basse énergie s'avère déterminante pour l'astronomie gamma. En effet, c'est en étudiant simultanément les photons de basse énergie (quelques **keV**) et les photons de haute énergie que certains astres révèlent enfin leur vraie nature : **trous noirs** ou pas et dans quel état…

• Leur cœur bat grâce au CdTe, un matériau dont les qualités de **spectromètre** sont désormais reconnues pour les températures proches de la température ambiante (entre -40 °C et +20 °C). Il s'agit d'un cristal lourd (le numéro atomique moyen « Z » vaut 50) et dense ($\approx$ 6) lui permettant de stopper efficacement les photons gamma jusqu'à quelques centaines de keV alors que ces derniers traversent généralement la matière sans interagir. Ainsi, lorsqu'un photon gamma interagit avec un **électron** du cristal, ce dernier se trouvant arraché, emporte avec lui la quasi-totalité de l'énergie cédée par le photon. Quant à l'électron, il termine sa course dans le cristal en produisant des **paires « électron-trou »** en nombre proportionnel à la quantité d'énergie déposée par le photon incident. Un champ électrique appliqué au cristal accélère les paires en question. La mise en mouvement de ces nouveaux porteurs libres induit un courant transitoire, précieux signal qu'il va falloir « capturer » et traiter. Notons que ces porteurs ne migrent pas à la même vitesse selon qu'il s'agisse de trous ou d'électrons. L'écart est d'ailleurs si grand (un facteur 10 environ) que les porteurs les plus lents sont assujettis au phénomène de piégeage, provoquant « une perte de charge ». Ce phénomène, particulièrement accentué dans le CdTe, suppose un traitement spécifique de son signal. Enfin, la cristallogenèse du CdTe demeurant très complexe, la réalisation de ce semi-conducteur reste difficile et limite la taille des cristaux à quelques centimètres carrés de surface pour quelques millimètres d'épaisseur. Aujourd'hui, les progrès de l'industrie pour la fabrication des cristaux, la réalisation des contacts métal/semi-conducteurs et la stabilité des senseurs ont permis de bouleverser les limites en s'approchant des performances ultimes de ce matériau. En particulier, les cristaux monolithiques les plus récents, équipés d'électrodes segmentées, présentent des **courants de fuite** (source limitant le bruit électronique) 1 000 fois plus faibles qu'il y a 10 ans. Il s'avère désormais possible d'accélérer les porteurs pour limiter le piégeage et traiter ainsi le signal plus aisément. Le traitement du signal est réalisé par les microcircuits IDeF-X (pour *Imaging Detector Front-End*).

• La micro-électronique jouerait le rôle de système nerveux central avec des circuits adaptés aux signaux spécifiques des détecteurs CdTe et aux contraintes de leur intégration physique dans un composant hybride modulaire. Aujourd'hui, la production des circuits IDeF-X s'effectue grâce à une technologie CMOS



CEA

Microcircuit IDeF-X V2 pour ECLAIRs. Les 32 structures parallèles, visibles sur l'image, sont des chaînes de spectrométrie indépendantes séparées de seulement 170 µm. Ce circuit à bas bruit et basse consommation est résistant aux radiations de l'environnement spatial.

standard et abordable. Dessinés avec un soin particulier, ils supportent l'environnement **radiatif** selon deux modalités : soit en termes de dose cumulée dont l'effet modifie les propriétés des transistors et altère les performances des circuits, soit au plan d'événements singuliers du **rayonnement cosmique** dont l'effet peut aller jusqu'à la destruction des circuits. Bien que leur surface n'excède pas une vingtaine de millimètres carrés seulement, les puces électroniques IDeF-X permettent d'intégrer 16 ou 32 chaînes de détections indépendantes, selon les versions. Leur mission consiste à collecter les charges délivrées par le détecteur, à réaliser l'amplification et la mise en forme du signal, à mémoriser les données. Ces puces présentent l'avantage de ne produire qu'un niveau de bruit très faible : à peine celui d'une trentaine d'électrons RMS (*Root Mean Square*) lorsque la puce est isolée. Une fois le circuit connecté à un détecteur, le bruit de l'ensemble demeure inférieur à une soixantaine d'électrons rms, soit cinq fois moins qu'avec le circuit équipant la caméra ISGRI. Ces circuits, associés de façon classique à de bons cristaux de CdTe, permettent de détecter des photons de 1,5 keV à 250 keV. Leur seuil bas, à la limite inférieure de la gamme de détection, est environ deux fois et demie plus faible que sur les meilleurs circuits équivalents existant par ailleurs dans le monde. Cette performance offre un atout maître aux futures missions ECLAIRs et SIMBOL-X.

• Les composants hybrides 3D et le *packaging* en formerait l'enveloppe charnelle. Préparer un imageur, avec ses détecteurs CdTe et ses circuits IDeF-X associés, passe par leur assemblage dans un composant hybride. Le plus dense de ces composants se nomme *Caliste 256*. Il est équipé d'un cristal de CdTe d'un centimètre carré, pixélisé au pas de 580 µm, chaque pixel étant connecté à une chaîne IDeF-X. Huit circuits IDeF-X fonctionnent simultanément pour extraire les 256 signaux d'un seul *Caliste*. Spécifiée pour l'observation d'un large champ de vue, la grande surface de l'imageur s'agence avec une mosaïque de composants *Caliste*, chacun aboutable sur ses quatre côtés pour ne laisser subsister aucune zone morte (figure 1). Ceci implique que les huit circuits IDeF-X puissent être entièrement disposés sous la petite surface de CdTe. Pour y arriver, la solution consiste à empiler les circuits et à les présenter perpendiculairement à la surface du cristal. Cette prouesse technologique a été exécutée par la société française 3D Plus. Pour une utilisation dans l'espace, ces modules unitaires de détection présentent une garantie de fiabilité qui réduit considérablement les risques de panne dans un imageur spectrométrique. Il faut dire que ce composant a été conçu de manière à résister aux stress mécaniques, thermiques et radiatifs inhérents à la mise en orbite.

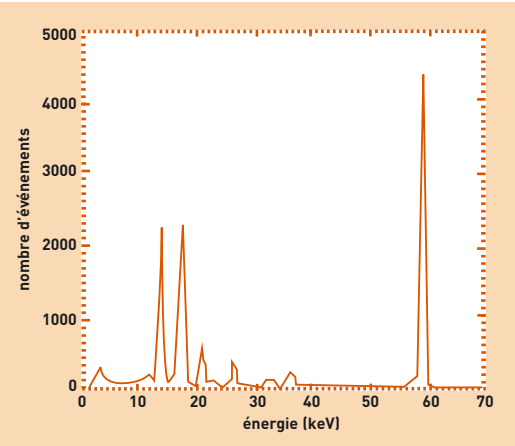
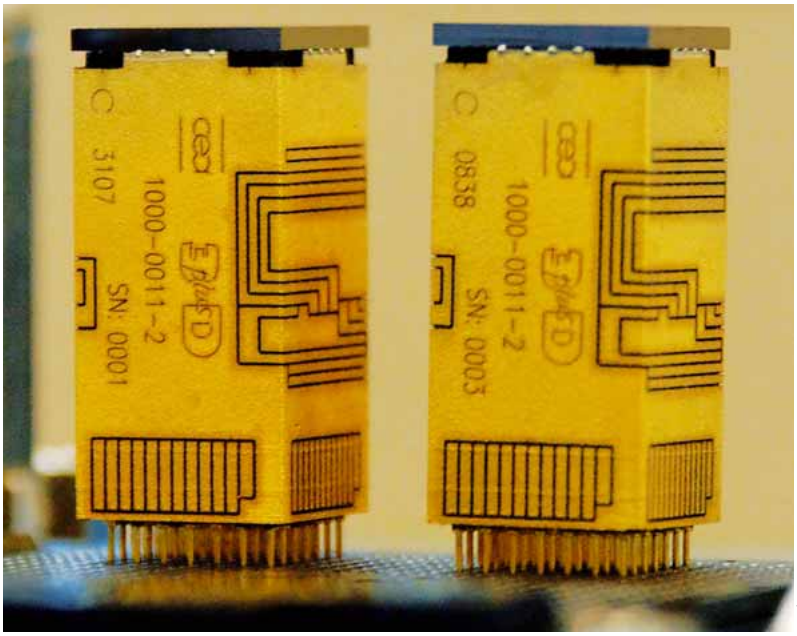


Figure 1.
Exemple d'un spectre enregistré avec *Caliste 64*. La figure représente la distribution en énergie des photons émis par une source d'américium 241. Ce spectre est constitué de la somme des réponses de 64 pixels indépendants étalonnée en énergie. La résolution spectrale vaut environ 900 eV fwhm à 60 keV. Le seuil de détection vaut environ 1,5 keV (A. Meuris/CEA).



CEA/Cnes

Modules *Caliste 256*. Chacun des ces deux prototypes est un spectro-imageur miniature de 1 cm de côté et environ 2 cm de haut. Un cristal de CdTe est placé au sommet d'un composant électronique (doré) dans lequel huit circuits IDeF-X sont empilés verticalement.

Aujourd'hui, les chercheurs ne connaissent qu'un mot capable de qualifier ce détecteur de nouvelle génération : impressionnant ! Ses performances en apportent la preuve :

• la résolution spectrale, inférieure à 900 eV FWHM (*Full Width at Half Maximum*) à 60 keV devient six fois plus précise que pour ISGRI ;

• le seuil bas descend à 1,5 keV contre 15 keV pour ISGRI ;

• les pixels sont 100 fois plus petits.

Lorsqu'il sera placé au foyer d'un télescope de type SIMBOL-X, ce modèle de spectro-imageur CdTe pour les rayons gamma apportera, de façon certaine, une quantité extraordinaire de résultats scientifiques.

> Olivier Limousin
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles
(CEA-Université de Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

> Eric Delagnes
Service d'électronique des détecteurs et d'informatique (Sedi)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay

Scruter le Soleil avec GOLF-NG

Voilà quatre siècles au moins que le Soleil manifeste une activité fortement variable montrant, de manière récurrente, des taches sombres à sa surface. Les incidences de cette variabilité sur l'atmosphère terrestre restent encore mal comprises des chercheurs malgré des corrélations surprenantes avec le climat du passé. L'invention de techniques innovantes permettra seule de maîtriser les processus générant cette variabilité et de prédire l'activité solaire du prochain siècle.

Photo Link

Le CEA, impliqué dans les problématiques d'environnement terrestre, construit un deuxième **spectromètre à résonance** multicanal appelé GOLF-NG (pour *Global Oscillations at Low Frequency* et *New Generation*). Pour cet instrument, il s'agira d'éclaircir les rôles respectifs joués par le cœur solaire et la région de transition entre la photosphère et la chromosphère d'où émergent des régions plus sombres appelées « taches solaires » ou plus brillantes appelées « facules » (figure 1).
Depuis plus d'une dizaine d'années, le satellite SoHO (pour *Solar and Heliospheric Observatory*) scrute le Soleil interne et externe, en continu, grâce à une dizaine d'instruments capables d'enregistrer

toutes les manifestations de son activité – une collaboration entre l'**ESA** et la **NASA**. Ainsi SoHO suit, en permanence, les éjections de matière coronale, l'émission de particules appelée « **vent solaire** » ou encore des taches sombres apparaissant régulièrement à la surface du Soleil et migrant, au cours du temps, des hautes latitudes vers l'équateur. Les astrophysiciens connaissent bien la source de ce phénomène occasionné par une température locale plus froide associée à une augmentation du **champ magnétique**. Le mérite revient à ce satellite d'avoir révélé l'origine interne de cette activité magnétique grâce à la mesure d'**ondes** stationnaires permanentes excitées par la convection. Il suit donc de nouveaux indicateurs d'activité depuis déjà plus de 15 ans.

Le principe des mesures sismiques solaires

La meilleure façon de connaitre les ondes internes pénétrant jusqu'au cœur du Soleil consiste à mesurer la variation temporelle de la « **vitesse Doppler** » du **Soleil** par rapport à l'observateur et d'en extraire le spectre de fréquence des modes internes. Cette vitesse, d'environ 1 km/s, s'apprécie en fonction du décalage en longueurs d'onde de raies bien connues comme le sodium ou le nickel. Ces raies d'**absorption** se forment dans l'atmosphère solaire agitée par la **turbulence**. La raie de sodium est utilisée par GOLF et le nickel par MDI (pour *Michelson Doppler Imager*), deux instruments embarqués sur le satellite d'observation SoHO. C'est l'analyse de la lumière provenant des raies d'absorption de ces éléments dans l'atmosphère solaire qui donne ces vitesses.

L'instrument GOLF offre aux astrophysiciens un concept de spectromètre à résonance extrêmement performant. Il opère par étapes. La première consiste à filtrer les **photons** solaires dans une gamme de longueurs d'onde correspondant à la raie du sodium. Ensuite, les photons ainsi absorbés sont capturés dans une cellule contenant un gaz pur de sodium, puis réémis dans un mince pinceau de longueur d'onde, sur chaque flanc de raie. Par sa référence atomique, il s'agit d'une méthode de précision unique. Elle permet notamment de mesurer l'interférence constructive des modes générant un **signal stochastique** dont la vitesse est de l'ordre du m/s. Ce signal se surimposant à la vitesse globale du déplacement du soleil, sa mesure temporelle donne le spectre fréquentiel des modes. Pour améliorer la qualité de détection de signaux individuels très faibles, GOLF-NG va extraire le signal à huit hauteurs dans la raie du sodium NaD1 (figure 2).

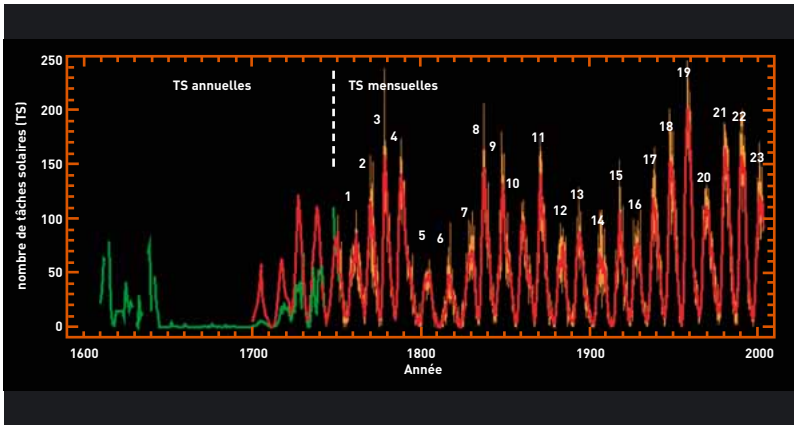


Figure 1.
Depuis les premières observations de Galilée, le nombre de taches a varié sur la surface du Soleil, rythmé par un cycle de 11 ans, mais avec une amplitude encore inexpliquée.

Les signaux extrêmement faibles d'un Soleil bien turbulent

Depuis plus de dix ans, les sondes spatiales se succèdent : après SoHO viennent les satellites PICARD[1] (microsatellite du **Cnes**) et SDO (pour *Solar Dynamics observatory*) dont les lancements sont prévus pour fin 2009. Grâce à ces instruments, les

(1) Du nom de l'astronome français Jean Picard (1620-1682) qui fit les premières mesures de précision du diamètre solaire au XVIIe siècle.

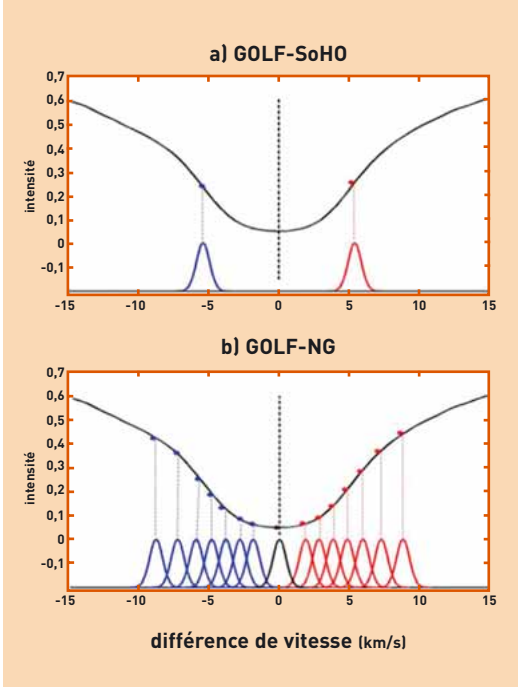
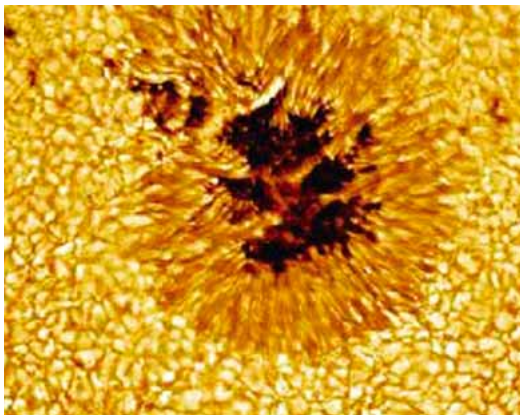
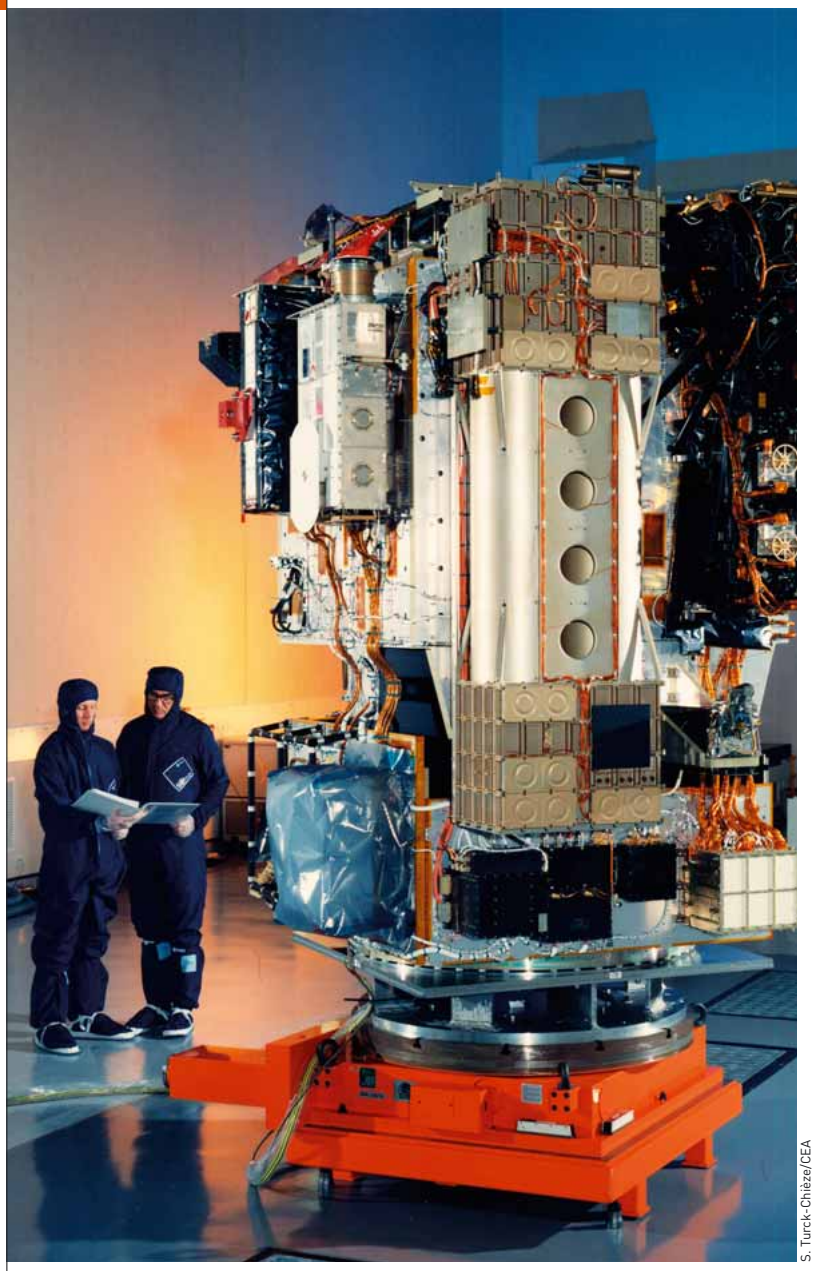


Figure 2.
Principe de mesure du spectromètre à résonance multicanal : les huit mesures bleues sont simultanées car la cellule, remplie de gaz de sodium, est placée dans un aimant à champ variable ; l'alternance de mesures bleues et rouges est garantie par un polarisateur à cristaux liquides.



CEA

Un zoom sur une tache solaire montre comment la granulation de surface fait place à une matière dominée par le champ magnétique.



S. Turck-Chièze/CEA

Le satellite SoHo (lors des derniers tests d'intégration) a été lancé par une fusée Atlas-Centaure et scrute le Soleil à 1,5 million de km de la Terre. Ce satellite, lancé en 1995, est toujours en observation avec des instruments qui étudient le Soleil, du cœur à la couronne. L'instrument GOLF est visible à gauche de l'image.

connaissances vont progresser sans pour autant que toutes les problématiques soient résolues. En effet, il faut savoir que les modes acoustiques déplacent les couches atmosphériques selon une vitesse individuelle maximale de 20 cm/s avec une périodicité de quelques minutes. Les **modes de gravité**, sondes indispensables pour atteindre la dynamique du cœur solaire, se manifestent par des signaux périodiques de quelques heures et des vitesses n'excédant pas 1 mm/s, soit des déplacements d'environ 18 mètres à la surface d'un soleil bien turbulent. Ce défi, l'instrument GOLF l'a déjà partiellement relevé en réalisant des mesures à 400 kilomètres au-dessus de la **photosphère solaire**, région plus calme et transparente et en détectant les premières manifestations des modes de gravité. Avec lui les équipes du CEA écrivaient la grande épopée dont GOLF NG contribuera à tourner l'ultime page.

GOLF-NG un spectromètre à résonance multicanal

Avec ce nouvel instrument entièrement réalisé à l'Irfu, il sera notamment possible de mesurer simultanément le spectre des modes d'oscillation solaires à huit hauteurs dans l'atmosphère (figure 3) entre 200 et 800 kilomètres au-dessus de la **photosphère**. Pour les astrophysiciens, ce spectromètre particulier présente une série d'avantages. D'abord, il offre une meilleure détection des signaux acoustiques en raison de leur amplitude croissant exponentiellement, avec la hauteur, dans l'atmosphère. Ensuite, il perfectionne la détection des modes de gravité résultant de la réduction des **effets granulaires**. Enfin GOLF-NG mesure en continu l'évolution du comportement global de l'atmosphère, entre la photosphère et la **chromosphère**, région d'émergence du flux magnétique.

Le champ magnétique, nécessaire pour réaliser l'échantillonnage en huit points de la raie D1 du sodium, n'est autre qu'un champ axial linéairement variable de 0 à 12 **KGauss**. Il s'obtient à l'aide d'un aimant permanent construit avec des aimants en néodyme-fer-bore et des pièces polaires en fer-cobalt de petite taille (20 x 15 x 10 cm^3). L'homogénéité transverse du champ, en tout point de sa variation le long de son axe, est meilleure de 2 % dans un volume cylindrique de 10 mm de diamètre. Cette propriété garantit l'uniformité de la réponse en longueur d'onde pour l'ensemble du volume de résonance de la cellule de gaz. Réalisée en pyrex haute température, celle-ci comporte deux parties indispensables au déroulement de l'opération : le

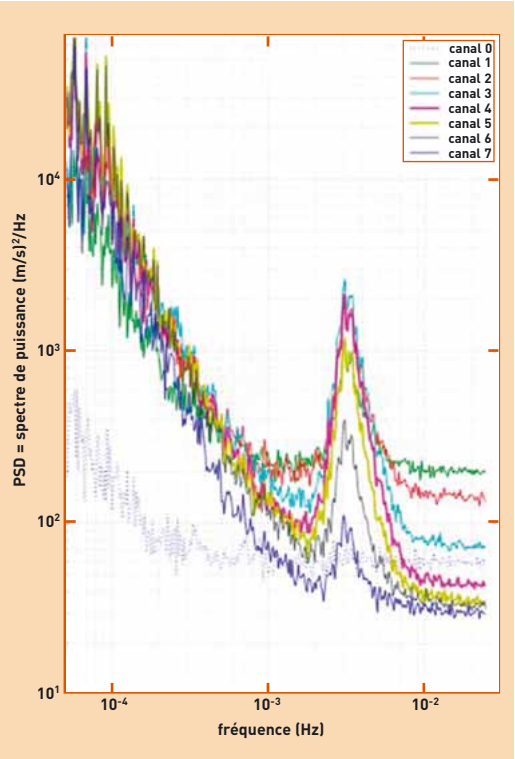


Figure 3.
Première lumière d'un prototype du spectromètre à résonance multicanal GOLF-GN. Sur cette figure apparaît le spectre des modes acoustiques, mesuré simultanément à huit hauteurs dans l'atmosphère. L'étape suivante consistera à améliorer la détection à basse fréquence pour affiner la détection des modes de gravité solaires.

sodium pur se trouve à l'état solide dans sa partie inférieure nommée queusot lorsque la cellule est froide ; lors du chauffage, celui-ci monte dans l'ampoule supérieure placée dans l'axe du champ magnétique croissant, lieu des processus de résonance (figure 4). L'ampoule de verre laisse libres 31 ouvertures pour les photons réémis, bien qu'habillée d'un masque optique et d'éléments chauffants. Les températures de fonctionnement atteignent 190 °C dans la partie supérieure et 175 °C dans la partie inférieure afin d'éviter toute condensation sur ces fenêtres. La puissance électrique nécessaire pour chauffer la cellule jusqu'aux températures indiquées ne dépasse pas les 2 watts. Aucun dispositif de régulation n'y a été installé – l'objectif étant d'éviter tout bruit périodique, d'ordre thermique ou électrique, dans la gamme de fréquence des ondes à détecter (jusqu'à 50 microhertz environ). La stabilité du dispositif, son homogénéité thermique et sa faible consommation résultent de deux éléments : d'abord, d'isolations thermiques à base d'écrans cylindriques en aluminium placés autour de la cellule ; ensuite, de la fabrication des pièces de suspension en chrome-cobalt, matériaux à très faible conductivité thermique.

L'ensemble s'intègre dans une pièce mécanique de haute précision, réalisée en inox amagnétique, placée dans l'entrefer de l'aimant et sans contact direct. Cette pièce assure également le placement et le maintien des éléments optiques composant les 31 voies de mesures des 8 canaux du spectrophotomètre. Constitués de lentilles sphériques traitées antireflet, ces éléments optiques ont été dimensionnés de manière à pouvoir travailler avec des températures atteignant les 80 °C. Ces lentilles captent un maximum de lumière de résonance de l'intérieur de la cellule et, par couplage à une fibre optique en silice, la guident vers la matrice de photodétecteurs. En amont de l'aimant, un sous-ensemble compact assure trois missions : traiter le faisceau solaire incident, garantir un éclairement uniforme dans la cellule et le changement d'état de la **polarisation**. Cette dernière étape nécessite l'utilisation d'un cube séparateur de grande pureté et d'un retardateur de phase pourvu d'une lame à cristaux liquides. C'est le changement de phase qui induit le changement de polarisation circulaire du faisceau, à un rythme pouvant passer sous la seconde pour des durées de commutation inférieures à la dizaine de millisecondes. Ce dispositif à cristaux liquides, développé par des chercheurs de l'**Institut d'astrophysique des Canaries**, autorise une pureté de polarisation allant jusqu'à 99,99 %. Fonctionnel depuis janvier 2008, GOLF-NG reste l'unique spectromètre solaire capable d'acquérir, de façon simultanée et rapide, la vitesse Doppler à huit hauteurs dans l'atmosphère solaire. Son optimisation devrait permettre aux chercheurs d'atteindre les performances requises par les missions spatiales et de garantir la fiabilité de l'instrument. Une première campagne d'observations s'est déjà déroulée, en été 2008, à Teneriffe (Espagne) qui a permis de qualifier le principe de ce nouveau spectromètre.

Pour les astrophysiciens, GOLF-NG figure déjà comme l'instrument indispensable à la compréhension des manifestations internes de l'activité solaire en région **radiative**. Il suivra d'abord l'activité solaire au sol mais a vocation, à terme, d'intégrer une future mission solaire spatiale. Un grand projet spatial a également été étudié avec l'industriel **Thalès**, pour les prochaines missions de l'ESA. Ce projet ambitionne l'observation globale et locale de l'activité solaire ainsi qu'une étude de la basse couronne. Surveiller la dynamique solaire à court et moyen terme (de l'ordre de la dizaine ou de la centaine d'années) et suivre son impact sur l'atmosphère terrestre, voilà le grand défi des prochaines décades.

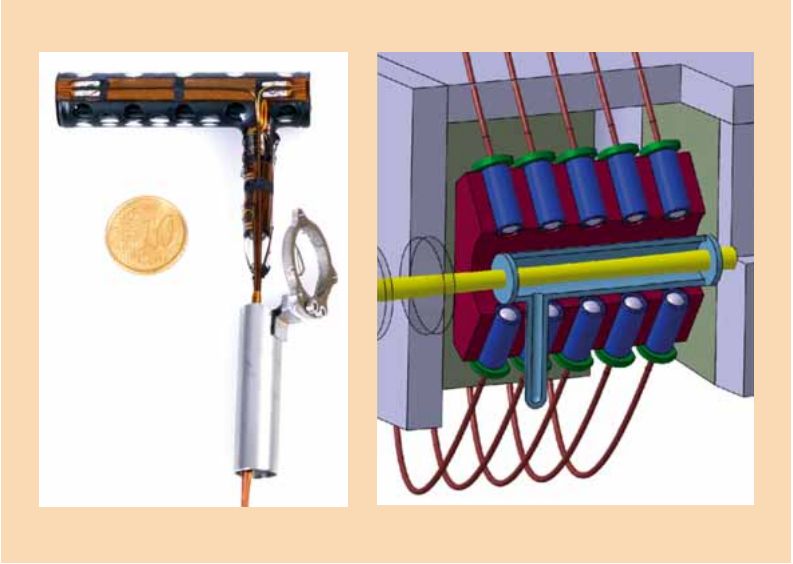
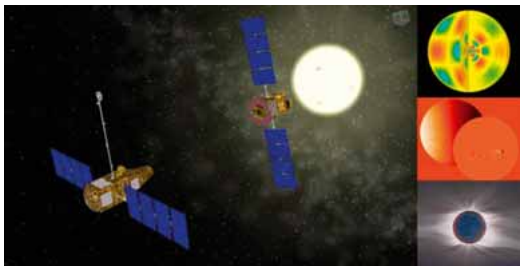


Figure 4.
Cellule et coupe en trois dimensions du schéma d'implantation dans l'aimant.



NASA

Pour succéder à l'observatoire solaire conçu entre l'Agence spatiale européenne (ESA) et la NASA, une mission de vol en formation est proposée pour décrire complètement et continûment l'impact de l'activité solaire sur l'environnement de la Terre.

> Sylvaine Turck-Chièze
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles
(CEA-Université de Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

> Pierre-Henri Carton
Service d'électronique des détecteurs et d'informatique (Sedi)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay

MÉMO B

De la lumière à l'image

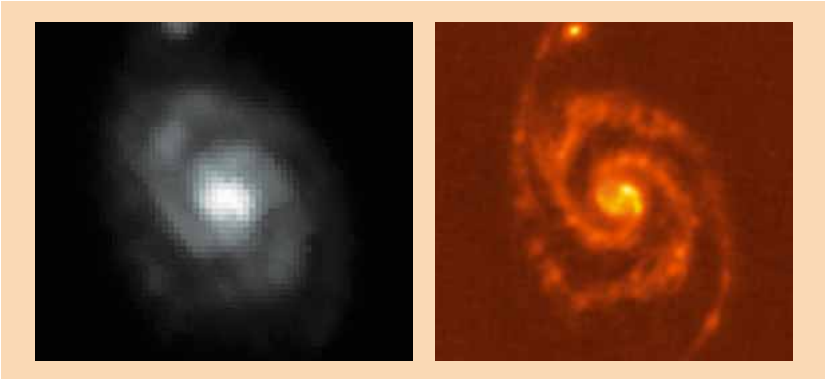
Nous baignons dans la lumière. Elle nous entoure, paraissant à chacun évidente et familière. Pourtant, l'œil humain n'est sensible qu'à une infime partie du spectre lumineux, la région comprise entre 400 et 700 µm environ. Ainsi, à côté de la lumière visible, existe-t-il une lumière invisible constituant la grande majorité du spectre électromagnétique (voir *mémo A*). Pour connaître et explorer l'Univers de façon aussi complète que possible, les astrophysiciens ont besoin de collecter l'ensemble de ces lumières invisibles pour réaliser des images du ciel « invisible ». Jusqu'à présent, ce type d'images a souvent permis de mettre en lumière un Univers inattendu, comme un Univers variable à l'échelle de quelques heures dans le domaine de la lumière γ.

Comment procéder pour représenter des astres émettant des lumières invisibles sur des cartes visibles ? Cette question pose le rapport entre l'astrophysique et l'image. Par définition, une image est la représentation, analogique ou numérique, en deux voire trois dimensions, d'une réalité appréhendée par la mesure d'une grandeur physique. Une image de l'invisible est donc l'image d'une réalité impossible à observer à l'œil nu. La traduire en une image visible à nos yeux suppose de passer par une série d'étapes. La première d'entre elles consiste à utiliser un détecteur, instrument capable de capter la lumière invisible émise par une source lumineuse, puis à convertir la lumière reçue en courant électrique mesurable – le détecteur faisant office d'interface entre la lumière et le signal. À titre de comparaison, il s'agit d'un procédé similaire à celui convertissant la lumière solaire en électricité au moyen de cellules photovoltaïques. Mais il existe bien d'autres moyens pour transformer la lumière en signal. Par exemple, les **bolomètres** conçus pour scruter le ciel dans le **rayonnement infrarouge** submillimétrique convertissent la lumière en une variation de la température d'un matériau qui l'absorbe. Ce modeste échauffement induit une variation de résistance électrique de ce même matériau : la mesure de cette variation donne alors accès au flux lumineux incident.

ESA & The PACS Consortium

Image de la galaxie M 51 (galaxie Whirlpool) dans l'infrarouge lointain, en trois couleurs : le rouge, le vert et le bleu correspondent à trois longueurs d'onde : 160, 100 et 70 µm (*Photodetector Array Camera and Spectrometer / PACS*).

La seconde étape, la digitalisation, consiste à traduire ce signal sous forme numérique pour le rendre apte au traitement informatique. Plus l'intensité de la source lumineuse est élevée, plus l'instrument donnera, « en sortie », un signal élevé. Les images numériques ainsi obtenues se composent de milliers, ou de millions, de carrés qui doivent être aussi petits que possible pour obtenir une image fine. L'image est ainsi formée d'une mosaïque de nombres représentant chacun l'information lumineuse reçue par chaque élément. Dans le vocabulaire de l'informatique, ces petits carrés portent le nom de **pixel** (« px » en abrégé), contraction de l'expression anglaise *picture elements*, c'est-à-dire « éléments d'image ». Il s'agit donc de la plus petite unité de surface permettant de définir la base d'une image numérique. Celle-ci n'est donc rien d'autre qu'un tableau à deux dimensions dont chaque case est un pixel. Pour obtenir informatiquement une image, il suffit



NASA/JPL-Caltech / SINGS et ESA & The PACS Consortium

Image de la galaxie spirale M 51 (galaxie Whirlpool) dans l'infrarouge lointain (160 µm) par Spitzer/MIPS (à gauche) et par Herschel/PACS (à droite). Grâce à son miroir de 3,5 m, à comparer à 0,8 m pour Spitzer, Herschel permet des images d'une bien meilleure résolution.

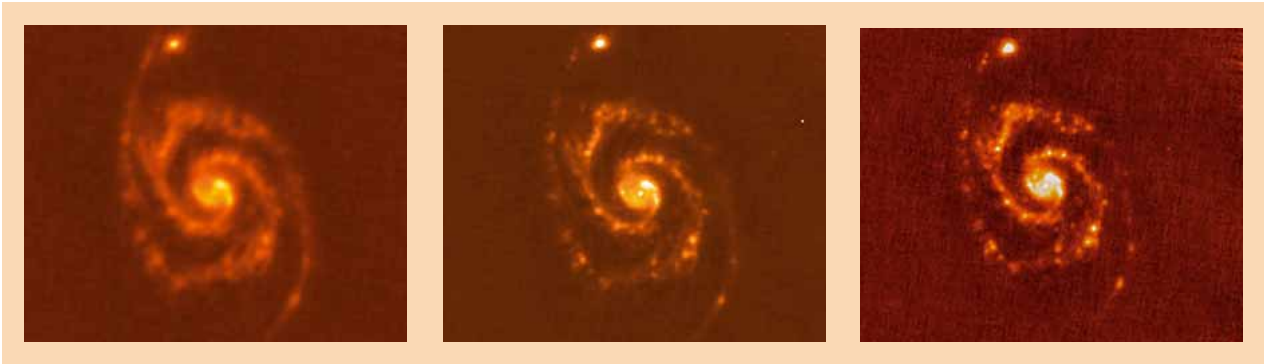


Image de la galaxie spirale M 51 (galaxie Whirlpool) données par Herschel/PACS dans trois longueurs d'onde : 160 µm (à gauche), 100 µm (au milieu) et 70 µm (à droite). On peut constater sur ces images que la résolution augmente quand la longueur d'onde diminue.

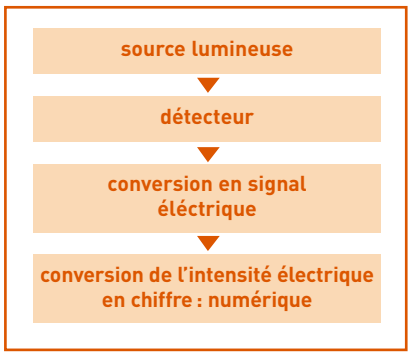
donc de créer un tableau de pixels dont chaque case contient une valeur numérique. La qualité d'une image dépend directement de sa définition, autrement dit du nombre de pixels enregistrés en hauteur (dans l'axe vertical) et en largeur (dans l'axe horizontal). Les spécialistes s'expriment en termes de « dimension informatique », soit le nombre de colonnes de l'image multiplié par son nombre de lignes. L'intervalle de nombres que peut porter un pixel s'avère également très important car il traduit la dynamique lumineuse dont le capteur sera capable de rendre compte.

La valeur stockée dans un pixel est codée sur un certain nombre de bits déterminant la couleur ou l'intensité du pixel. L'ultime étape du processus consiste donc à établir ce code. Dans toutes les disciplines de la communication, qu'il s'agisse de mots ou d'images, un code se définit comme une règle visant à convertir de l'information sous une autre forme de représentation. Un code exprime une idée, un concept. Pour les astrophysiciens qui veulent établir des cartes de l'Univers à partir d'une gamme d'énergie détectée par leurs instruments, il s'agit de définir une convention de couleurs. Chaque discipline possède la sienne : par exemple, sur les cartes de navigation aérienne, la coloration rouge indique la présence d'orages tandis qu'en agriculture, le vert désigne un espace cultivé. Le code de couleurs défini, il faut ensuite établir un *continuum* d'intensité par rapport à l'unité de base : par exemple, pour rester dans le domaine de l'agriculture, un spectre de verts allant de la culture intensive au désert en passant par différents pourcentages de déforestation. Ce spectre peut se définir comme une sorte de faux arc-en-ciel. En astrophysique, la gamme des couleurs permettant de coder les sources lumineuses s'étend souvent du rouge au bleu indigo ; dans cette discipline, du plus froid au plus chaud, mais aussi du moins énergétique au plus énergétique…

Une fois l'image digitalisée et codée, tous les problèmes ne sont pas résolus pour autant. Pour l'astrophysicien, reste à régler la question de la résolution angulaire qui est égale au rapport entre la longueur d'onde dans laquelle s'effectue l'observation et la taille du miroir du télescope qui collecte la lumière. La résolution angulaire mesure la taille angulaire des plus petits détails perceptibles par le télescope, exprimés en degrés, en minutes, voire en secondes d'arc. Ainsi, à taille de miroir constante, plus la longueur d'onde de la lumière captée s'avère courte, plus les détails de l'image sont fins. Autre solution pour améliorer la finesse de l'image : augmenter le diamètre du miroir. Que se passe-t-il si l'on observe deux sources lumineuses angulairement proches ? Il existe deux cas de figures possibles. Si la séparation des deux sources est supérieure à la résolution angulaire, le télescope distinguera les deux sources. Dans le cas contraire, ces deux sources sembleront n'en former qu'une seule. Même dans l'hypothèse où le télescope a la capacité de séparer ces deux sources, il faut bien choisir son détecteur ! En effet, si les images des deux sources se projettent toutes deux sur le même pixel du détecteur, l'image obtenue ne montrera qu'une seule source. En conséquence, à longueur d'onde fixée, la finesse de l'image dépend à la fois du diamètre du télescope (il doit être aussi grand que possible) et de la taille des pixels (ils doivent être aussi petits que nécessaire).

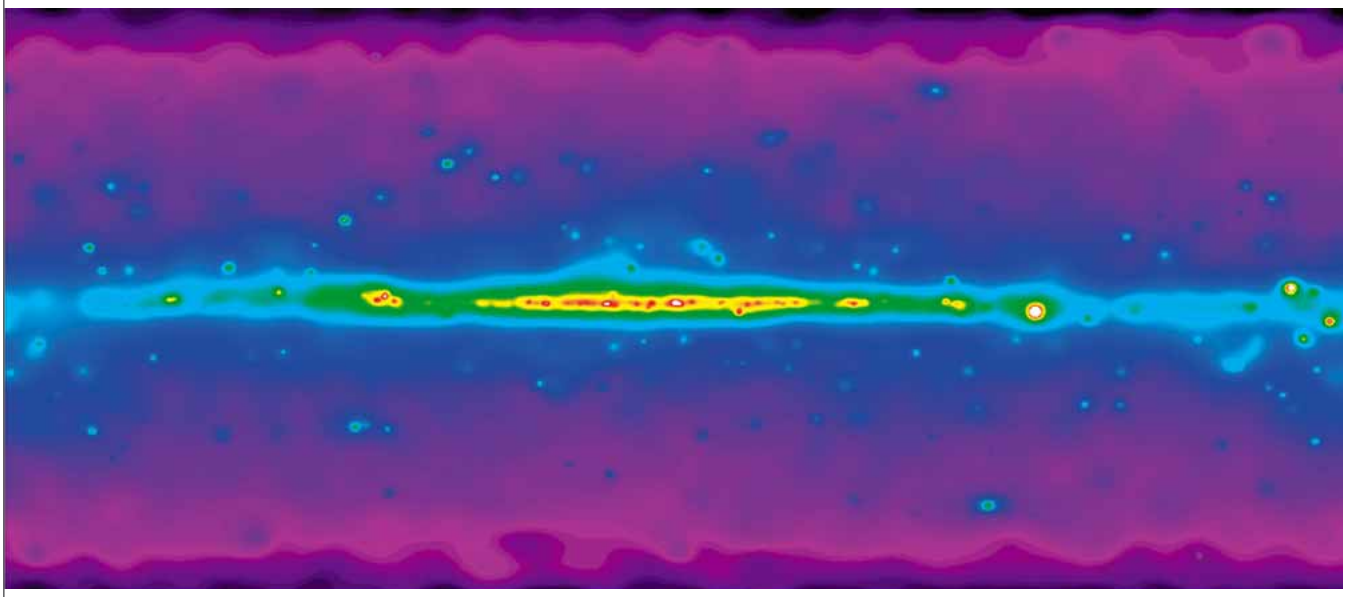
Dès lors, on comprend pourquoi les astrophysiciens conçoivent et fabriquent des télescopes dont la taille augmente sans cesse : ainsi, entre Galilée qui observait les étoiles avec une lunette dont la lentille ne dépassait pas 6 cm de diamètre, et le télescope spatial Hubble doté d'un miroir de 2,4 m de diamètre, les astrophysiciens ont gagné un facteur 40 en résolution angulaire (2,4 m/6 cm = 40). Autre exemple, celui d'Herschel, le plus grand télescope envoyé dans l'espace dont le diamètre atteint 3,5 mètres. De cet instrument qui détecte le rayonnement infrarouge et submillimétrique, les chercheurs attendent des informations extrêmement précises sur les systèmes solaires en cours de formation ou les processus physiques conduisant à la naissance d'étoiles et de galaxies. Mais, aussi sophistiqué et performant soit-il, dans cette longueur d'onde, la finesse de résolution de ce télescope ne dépassera pas celle de la lunette de Galilée. En revanche, Herschel va réaliser l'exploit d'observer dans les lumières invisibles du rayonnement infrarouge et submillimétrique, et d'apporter la lumière sur les mondes enfouis de l'Univers.

Les astrophysiciens en sont sûrs : ils vivent une véritable révolution.



L'analyse des données en astrophysique

Pour un astrophysicien, le signal traduit l'information émise par une source et qu'il doit interpréter. Grâce à l'informatique, le traitement du signal connaît depuis une dizaine d'années des développements spectaculaires qui permettent aux astrophysiciens de valider, affiner ou remettre en question la compréhension de l'Univers.



CEA

Simulation de six jours de données du satellite GLAST (pour *Gamma-ray Large Area Space Telescope*), rebaptisé *Fermi Gamma-Ray Space Telescope*. Bande d'énergie comprise entre 0,1 et 1 GeV, filtrée par l'algorithme MR-filter à base d'ondelettes.

Par suite de l'évolution des détecteurs qui touche toutes les longueurs d'onde, l'analyse des données occupe une place de plus en plus prépondérante en astronomie.

Le flux de données

Si, en 1980, les *Charge Coupled Device* (CCD ou dispositifs à transfert de charge) affichaient une taille de 320 x 512 **pixels**, les astronomes disposent aujourd'hui de véritables mosaïques de CCD équivalant à 16 000 x 16 000 pixels. Les méthodes ont progressé au point que l'engagement humain et financier pour traiter les données d'un instrument peut atteindre l'ordre de grandeur de la réalisation de l'instrument lui-même. Par exemple, la caméra ISOCAM équipant l'**Observatoire spatial infrarouge** (**ISO**) a nécessité l'élaboration de logiciels de commande, d'analyse en temps réel et en temps différé : soit 70 hommes.an alors que 200 hommes.an suffisaient pour la construction de la caméra. L'effort consenti pour le projet Planck s'avère encore plus important. De plus, la quantité de résultats – parfois plusieurs centaines de **téraoctets** – fait appel à des bases de données et au développement d'outils sophistiqués (figure 1).

Les connaissances donnent lieu à de nouvelles questions dont la résolution s'appuie sur l'observation d'un objet ou d'une région du ciel. L'analyse de données intervient lors de la calibration de ces données, de l'extraction de l'information ou de la manipulation des bases de données. Des études statistiques permettent aussi d'enrichir la connaissance : c'est le cas pour les études sur le nombre de **galaxies** d'une **luminosité** donnée par unité de volume. On appelle « connaissance » l'ensemble des théories relatives à l'astronomie (formation d'**étoiles**, de galaxies, cosmologie...), les bases de données d'objets, d'images et les catalogues, autrement dit la liste des objets détectés avec un instrument dans une région du ciel. Cette connaissance, qu'il s'agisse des articles ou des bases de données, se trouve le plus souvent disponible sur l'Internet.

Selon l'instrument, les données se présentent sous forme d'images, de spectres, de mesures **photométriques**. En général, les astronomes disposent d'un ensemble de données d'une région ou d'un objet d'étude – plusieurs images à différentes **longueurs d'onde** par exemple. Mettre en orbite des instruments (Hubble, Rosat, ISO, Soho...) présente l'avantage d'éviter les contraintes atmosphériques. Le processus nécessite plusieurs étapes.

En premier lieu, vient la phase de calibration indispensable pour corriger les effets instrumentaux des données grâce à plusieurs opérations :

- la correction du zéro (*Dark*) : en l'absence de **lumière**, les valeurs renvoyées par le détecteur ne sont jamais nulles à cause des effets électroniques et il faut donc soustraire le niveau « zéro » aux données ;

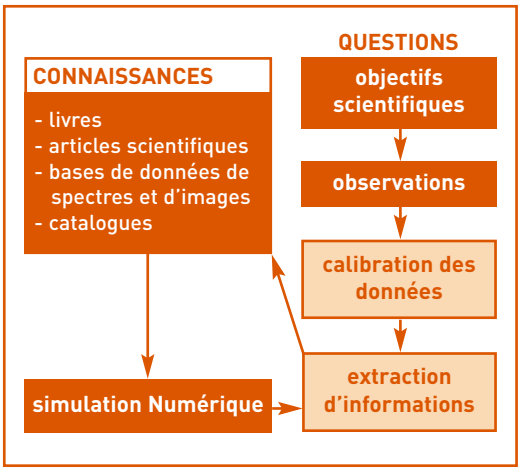


Figure 1.
Le flux d'information situe les niveaux où intervient l'analyse de données. Il permet de mieux comprendre à quels niveaux intervient cette analyse de données. À partir des connaissances, de nouvelles questions se posent et il est nécessaire de procéder à des observations d'un objet ou d'une région du ciel. Les données acquises vont devoir préalablement être calibrées, puis l'information utile à la réalisation de l'objectif scientifique doit être extraite. L'analyse de données intervient lors de la calibration, de l'extraction de l'information, et de la manipulation des bases de données. Il faut noter aussi que des études statistiques des bases de données permettent d'enrichir la connaissance (comme par exemple, les études du nombre de galaxies d'une luminosité donnée par unité de volume). On définit par connaissance l'ensemble des théories relatives à l'astronomie (formation d'étoiles, de galaxies, cosmologie...), les bases de données sur les objets, les bases de données d'images, et les catalogues (liste d'objets détectés avec un instrument sur une région du ciel). Cette connaissance est maintenant le plus souvent accessible par le réseau Internet (qu'il s'agisse des articles ou des bases de données).

• la correction des variations de réponse (*Flat*) : à éclairement égal, le détecteur ne répond pas de la même manière en chaque pixel ; aussi faut-il normaliser les données en les divisant par la réponse du détecteur ; les paramètres du détecteur doivent être bien connus, sinon les erreurs de précision se répercutent sur les mesures.

D'autres effets peuvent également être corrigés lors de cette première phase, comme la suppression des rayons cosmiques ou les effets de rémanence du détecteur ; toutes ces tâches étant plus ou moins ardues (figure 2).

Une fois les données calibrées, la phase d'analyse peut alors commencer. Suivant les objectifs, plusieurs mesures peuvent alors se faire, par exemple, sur la détection des étoiles et des galaxies ou sur la mesure de leur intensité, de leur position, de différents paramètres morphologiques : des résultats à comparer ensuite aux catalogues existants. Il s'avère impossible de citer toutes les opérations réalisables sur une image astronomique et nous n'avons donc cité ici que les plus courantes. Mener à bien cette extraction d'informations, suppose de surmonter des obstacles comme le bruit[1] et « la réponse instrumentale »[2]. Lorsque les informations utiles ont été extraites, elles sont confrontées à la connaissance en l'état. Cette étape valide, affine ou remet en question la compréhension de l'Univers. Le résultat final de cette réflexion se matérialise par la publication d'articles scientifiques paraissant dans des revues spécialisées.

Le volume de connaissance croît donc rapidement et nécessite des outils performants pour l'exploiter. Ces outils font office de moteurs de recherche pour aider à rassembler les derniers articles parus, des méthodes pointues d'imagerie ou encore des algorithmes établissant une correspondance entre des objets détectés dans une image et une base de données (sachant qu'il y a des choix à faire quand plusieurs « candidats » se présentent). La difficulté réside, en particulier, dans le volume des bases de données. SIMBAD, un ensemble d'identificateurs, de mesures et de bibliographie pour les données astronomiques, développé par le **Centre de données astronomiques de Strasbourg**, regroupe des informations sur plusieurs millions d'objets, correspondant à des millions de mesures observationnelles, avec des millions de références bibliographiques. La taille des images fournies par les instruments de nouvelle génération rend quasiment impossible l'accès aux archives d'images par le réseau lorsque celles-ci n'ont pas été préalablement comprimées.

La maîtrise et l'exploitation des bases de données représentent donc un enjeu important pour le futur. L'analyse statistique de catalogues amène, en outre, à contraindre les paramètres des modèles cosmologiques et donc à augmenter la connaissance. Par exemple, l'étude statistique des galaxies, individuellement différentes, révèle la présence de trois grandes familles (**spirales**, **elliptiques** et **irrégulières**), un peu comme les grains de sable d'une plage, tous différents, forment une zone homogène.

La théorie du *Compressed Sensing* et le projet spatial Herschel

Dans le cadre de certains projets spatiaux, il s'avère parfois impossible de transférer sur terre un volume important de données sans procéder à une compression de celles-ci. C'est le cas pour l'instrument

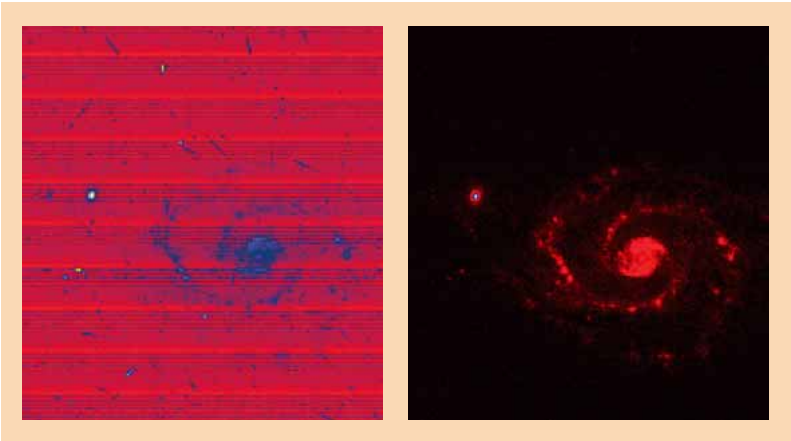
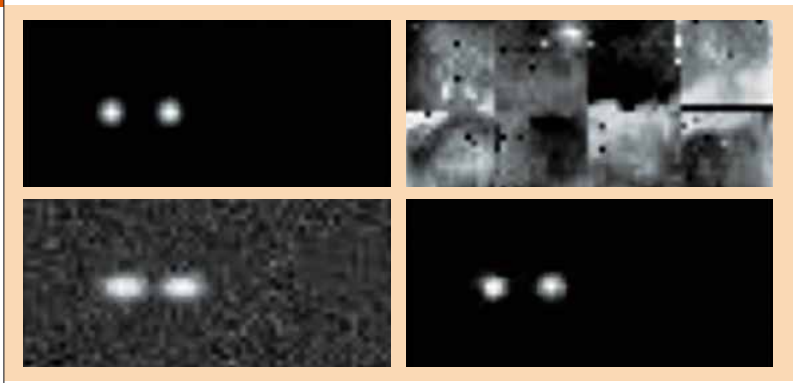


Figure 2.
La galaxie M51, vue par ISO, avant et après calibration.

(1) Le bruit est une fluctuation d'intensité aléatoire qui se superpose aux données ; il provient en partie du détecteur et, en partie, des données. En plus des erreurs que le bruit peut amener sur les mesures, il gêne énormément lors de la détection d'objet et peut être responsable de nombreuses fausses détections.

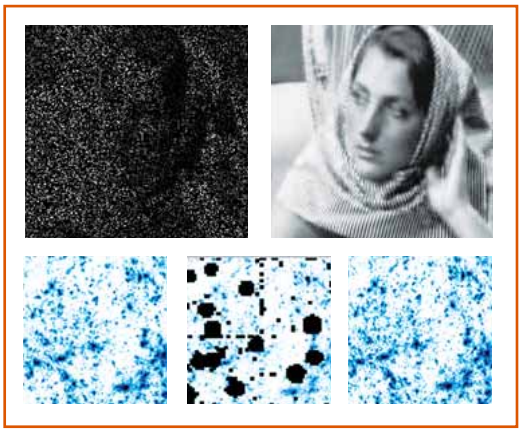
(2) L'image d'une étoile n'est pas un point, mais une tache. Cet étalement lié à l'instrument est appelé «réponse instrumentale». Son principal effet consiste en une perte de résolution car les objets proches se mélangent.



DR

Figure 3.
En haut, la simulation d'une image contenant deux sources et la même image vue par Herschel. En bas, à gauche, l'image a été calibrée après une compression classique et, en bas, à droite, la solution obtenue par la technique du *Compressed Sensing*.

PACS Herschel (*Photodetector Array Camera and Spectrometer*) qui nécessite une compression d'un facteur huit avec une puissance de calcul extrêmement faible. Les méthodes standard de compression d'image comme JPEG ne conviennent pas. Heureusement, depuis une dizaine d'années, d'importants développements en analyse harmonique permettent de représenter des images dans des bases de fonctions convenant à certains types d'objets. Par exemple, les ondelettes sont idéales pour détecter des structures, la **transformée ridgelet** est optimale pour la recherche de ligne et les curvelets représentent bien les contours ou les filaments contenus dans une image. Plus généralement, une représentation « parcimonieuse » des données conduit à de meilleures performances pour des applications aussi variées que la compression des données, la restauration d'images ou la détection d'objets. Une nouvelle théorie, *Compressed Sensing*, lie désormais formellement le nombre de coefficients non nuls dans une base donnée et l'échantillonnage nécessaire à une reconstruction exacte du signal. Ce récent concept montre que la contrainte sur le pas d'échantillonnage, fixée par le **théorème de Shannon**, peut être largement dépassée si le signal observé vérifie un « critère de parcimonie », c'est-à-dire s'il existe une base dans laquelle le signal présente peu de coefficients différents de zéro. Une étude préliminaire a montré que cette approche présenterait une excellente alternative aux systèmes de transfert de données actuellement en vigueur pour le satellite Herschel et, qu'à taux de compression constant, un gain de 30 % en résolution s'obtiendrait sur les images décomprimées (figure 3).



DR

Figure 4.
En haut et à gauche, l'image comporte 80 % de pixels manquants ; à droite, elle est restaurée.
En bas et à gauche, on trouve la simulation d'une carte de masse de matière noire, au milieu l'image est la même mais avec des zones manquantes et, à droite, l'image est reconstruite.
On a montré que l'erreur sur le spectre de puissance et le bispectre de la carte restaurée par *inpainting* est de l'ordre de quelques unités pour-cent. Cette méthode originale dépasse les problèmes d'astrophysique et a été transférée vers l'industrie dans le cadre d'un contrat CIFRE[3] avec la Sagem.

L'*inpainting* au secours des données manquantes

Les données manquantes constituent un problème récurrent en astronomie, dû à des pixels défectueux ou à des zones éventuellement polluées par d'autres émissions et que l'on souhaite masquer lors de l'analyse de l'image. Ces zones masquées occasionnent des difficultés lors de traitements ultérieurs, en particulier pour extraire des informations statistiques comme le spectre de puissance ou le bispectre. L'*inpainting* est la procédure qui va venir combler ces zones. Des travaux récents montrent que l'on peut reconstruire les zones manquantes en recherchant une solution parcimonieuse dans un dictionnaire de formes prédéfinies. Avec un choix judicieux de dictionnaire, on obtient des résultats fantastiques (figure 4).

Planck et l'extraction du fond diffus cosmologique

La mission spatiale Planck, qui a été lancée, le 14 mai 2009, par l'**Agence spatiale européenne** (**Esa**), en même temps que la mission Herschel, a pour objectif de cartographier des fluctuations spatiales d'intensité et de **polarisation** de l'émission du ciel millimétrique, en vue notamment de caractériser les propriétés statistiques des **anisotropies** du fond de **rayonnement** cosmologique fossile. Ces mesures permettront de contraindre fortement les **modèles** cosmologiques et, entre autres, de tester le modèle standard du big bang ainsi que de déterminer, avec une précision inégalée, les paramètres cosmologiques décrivant l'ensemble de l'Univers. Planck offre les meilleures perspectives pour comprendre ce modèle, de l'Univers primordial (inflation) à l'astrophysique des émissions galactiques, en passant par la formation des structures, les **amas de galaxies**, la **matière noire** et l'**énergie noire**, ou encore la topologie de l'Univers. Deux instruments sont opérationnels, le *Low Frequency Instrument* (LFI) et le *High Frequency Instrument* (HFI), pour obtenir neuf cartes de tout le ciel entre 30 et 1 000 **GHz**. Ces cartes contiendront le fond cosmologique, mais aussi d'autres composantes liées à des émissions galactiques (poussière) ou intergalactiques (galaxies, amas...). Celles-ci sont également d'un grand intérêt. Chaque carte présentant un mélange des différentes composantes (**fond diffus cosmologique**, poussière galactique...), la difficulté

(3) Conventions industrielles de formation par la recherche (CIFRE) : instruites et gérées par l'Association nationale de la recherche technique (ANRT) pour le compte du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, elles permettent à une entreprise de bénéficier d'une subvention annuelle forfaitaire en contrepartie des coûts qu'elle engage pour employer le jeune doctorant qu'elle a embauché pour trois ans.

consiste donc à retrouver les composantes « ciels » à partir des cartes. On appelle cette opération « séparation de sources » (figure 5).
En pratique, il faut de surcroît tenir compte des effets instrumentaux (le bruit...) venant compliquer encore cette séparation. Un problème de restauration de données se superpose donc à celui de la séparation de sources. En utilisant une méthode appelée *Generalized Morphological Component Analysis* (GMCA), basée sur la **transformée en ondelettes**, il devient possible de reconstruire le fond diffus. Le principe repose sur le fait que mélanger les composantes rend les images plus complexes et que, si on utilise un critère de régularisation basé sur le principe de la « simplicité de la solution » dans le problème de séparation, on peut retrouver des composantes recherchées. Dans cette approche, une image « simple » est représentable sur peu de coefficients en ondelettes ; il s'agit d'une solution dite parcimonieuse (figure 6).

Tests statistiques sur le fond diffus cosmologique

Certaines applications nécessitent des outils statistiques élaborés afin de mettre en évidence des signaux extrêmement faibles, noyés dans du bruit. Parmi les exemples intéressants figure celui de la détection de **sources non gaussiennes** dans le fond diffus cosmologique **micro-onde** (FDCM). Celui-ci résulte d'un découplage de la matière et de la **radiation** à un décalage cosmologique de 1 000. Il est une « relique » des premiers instants de l'Univers et aide à comprendre la formation et l'évolution des structures provenant de l'amplification des fluctuations initiales. Les propriétés statistiques des anisotropies de température du FDCM nous informent donc sur la physique de l'**Univers primordial**. En effet, si leur distribution est gaussienne, elles sont produites par des modèles simples d'inflation. Sinon, elles sont issues de défauts topologiques comme des cordes cosmiques. Des anisotropies peuvent également provenir de l'interaction des photons du FDCM avec des **électrons** libres du gaz chaud intra-amas : c'est l'**effet Sunyaev-Zel'dovich** (figure 7).
Pour trouver des signatures non gaussiennes très faibles, des tests statistiques très sensibles s'imposent. Ils pourraient dériver de l'étude statistique de la distribution des coefficients obtenus par des méthodes multi-échelles. Les ondelettes sont bien adaptées à l'analyse des structures spatialement **isotropes** et contribuent à détecter l'effet Sunyaev-Zel'dovich, tandis que les fonctions curvelets sont optimales pour la recherche de structures spatialement anisotropes. La combinaison de ces deux transformées multi-échelles permet non seulement de détecter au mieux les anisotropies dans le FDCM, mais aussi de déterminer leur origine, éventualité impossible avec les méthodes traditionnelles.

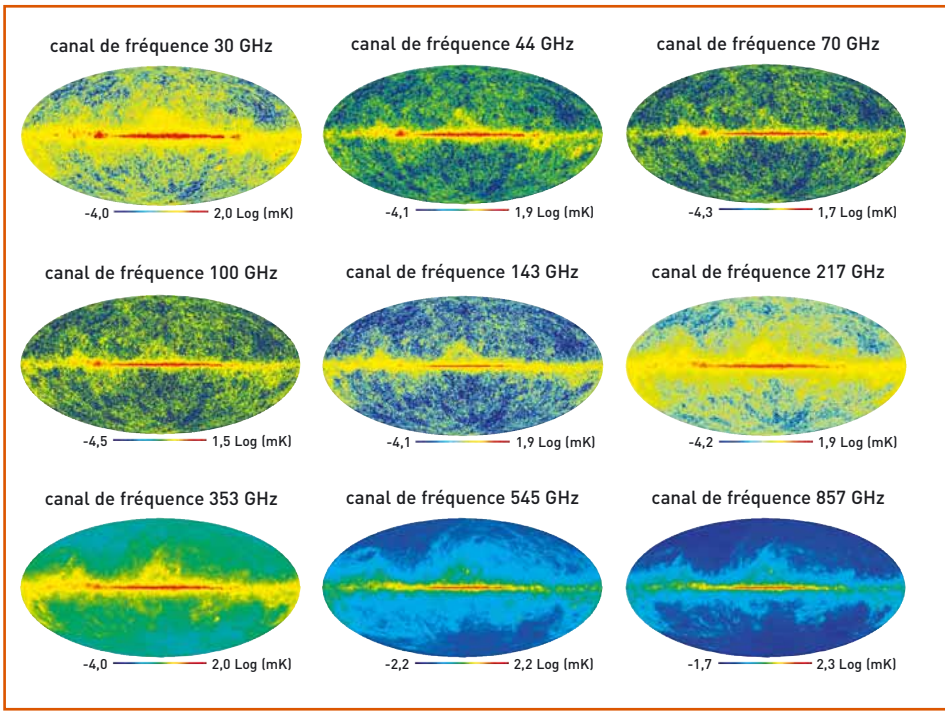


Figure 5.
Simulation des neuf cartes de Planck. Par exemple, pour obtenir le fond diffus cosmologique, il faut retrancher la contribution des autres composantes aux observations.
Échelle des valeurs : il s'agit de cartes de températures en mK, pour pouvoir avoir un contraste suffisant ; le logarithme des cartes est affiché.

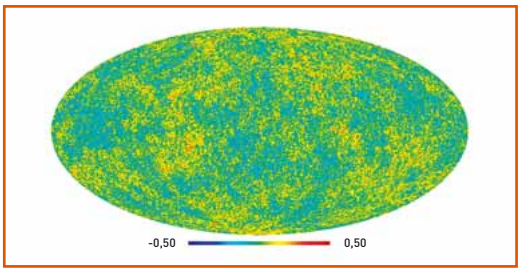


Figure 6.
Carte du fond diffus cosmologique obtenue par GMCA à partir des neuf cartes de la figure 5.

Figure 7.
Parmi ces quatre cartes, les trois premières sont des simulations du FDCM, de l'effet Sunyaev-Zel'dovich (en haut, à droite) et des cordes cosmiques (en bas, à gauche).
La quatrième représente le mélange de ces trois composantes (en bas, à droite), un type de données que pourrait fournir la mission PLANCK. La fonction ondelette est surimprimée en haut, à droite ainsi que la fonction curvelet est surimprimée en bas, à gauche.

> Jean-Luc Starck
Service d'électronique des détecteurs et d'informatique (Sedi)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles
(CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

La **simulation numérique** en astrophysique

Au dialogue exclusif entre théorie et observation, s'est substitué, depuis quelques années déjà, le triptyque théorie/simulation/observation. Entre des modèles théoriques toujours plus complexes et l'observation qui demeure le test ultime pour la validation des théories, la simulation numérique vient faire office de lien.

Informatique et prédictions théoriques en astrophysique

Pour la plupart, les théories physiques reposent sur des équations complexes et non linéaires. Elles mettent également en jeu des systèmes dynamiques propices au chaos et à l'imprédictibilité. Sans appui informatique, il devient donc quasiment impossible de calculer les prédictions d'une théorie, particulièrement en astrophysique.

Supercalculateur Bull du Centre de calcul recherche et technologie (CCRT) du CEA.

CEA

Alors que la plupart des sciences physiques parviennent à simplifier, à l'extrême, leur appareillage expérimental de façon à ne garder que le processus élémentaire à étudier, rien de tel en matière d'observation astronomique. La raison tient à l'impossibilité pour les chercheurs d'intervenir sur leur objet d'étude : ils ne peuvent généralement accéder qu'à des mesures partielles d'objets complexes se trouvant dans des états dynamiques divers et incontrôlables. D'où le rôle fondamental joué par la **simulation** (voir encadré) qui va établir le lien entre théorie et observation. La simulation permet également d'explorer certaines propriétés de modèles en réalisant des expériences numériques : il s'agit alors moins de confronter la théorie à l'expérience que d'explorer les conséquences de tel ou tel modèle. En astrophysique, la **gravité**, l'hydrodynamique, le **rayonnement** et le **champ magnétique** figurent comme les quatre principaux modèles à décrire.

La gravité

Il s'agit de la principale force intervenant dans la formation des structures cosmologiques quelle qu'en soit l'échelle. Parmi les plus grandes d'entre elles se trouvent les **amas de galaxies** dominés par la **matière noire** dont la gravité reste la seule force d'interaction. Sur la liste des plus petites, figurent notamment les **étoiles** et **planètes** en formation. Là, c'est la matière classique, dite **baryonique**, qui

Des processeurs travaillant avec une précision symphonique pour la simulation numérique

Outil très technique, la simulation numérique commence par la traduction, en algorithme, du jeu des équations modèles décrivant la théorie à valider. Comme ces algorithmes ne donnent qu'une approximation informatique des équations modèles, il faut ensuite mettre au point des algorithmes stables et précis, dont la solution s'approche de la réalité physique. L'opération relève du domaine des mathématiques appliquées permettant seul de créer et de valider de tels algorithmes. En astrophysique, les principaux phénomènes physiques que l'on cherche à décrire sont au nombre de quatre : la gravité, l'hydrodynamique, le rayonnement et le champ magnétique. Dans ces domaines spécifiques, il faut souvent développer des algorithmes sans équivalent dans d'autres domaines de la physique (notamment la gravité), même si on peut de temps en temps exploiter les travaux réalisés au profit de l'industrie (la mécanique des fluides par exemple). La simulation numérique impose, de surcroit, une parfaite maîtrise de l'outil informatique, notamment celle des supercalculateurs. En astrophysique, les modèles exigent toujours plus de mémoire et de puissance de calcul pour atteindre un réalisme suffisant. D'où le développement d'applications complexes qui exécutent nos algorithmes sur des architectures parallèles pour lesquelles plusieurs milliers de processeurs travaillent ensemble avec une précision symphonique. Le développement et l'utilisation de ces applications complexes n'est pas sans rappeler les défis de l'instrumentation spatiale. Pour filer la métaphore, les supercalculateurs seraient les nouveaux lanceurs et les applications développées, les nouveaux détecteurs. Aujourd'hui, la simulation n'en est encore qu'à l'ère des pionniers mais il y a fort à parier sur un développement croissant dans les prochaines années.

domine la masse. La **gravité** y demeure la force fondamentale de formation des structures mais viennent s'y ajouter tous les processus hydrodynamiques, magnétiques et de couplage au rayonnement. La **modélisation** de la gravité traverse donc toute l'astrophysique.

Pour représenter une distribution de masse, la méthode classique consiste à utiliser des « particules » numériques, dont chacune possède une masse, une position, une vitesse, et une constitution : matière noire, étoile, nuage de gaz, planète… Selon les problèmes et les calculateurs, le nombre N de ces particules se compte en millions, voire en milliards, dans les simulations modernes. Celles-ci se décomposant en **pas de temps** successifs, une problématique revient couramment, celle de calculer, aussi précisément que possible, la force gravitationnelle subie par une particule, exercée par les N-1 autres particules. La technique la plus simple et la plus précise consiste à calculer cette force pour toutes les paires de particules possibles puis à additionner les résultats. Néanmoins, cette méthode nécessite $N\,(N-1)$ calculs de distances, ce qui exige un temps de calcul prohibitif lorsque la simulation comporte de nombreuses particules. C'est pourquoi son emploi se restreint à des cas particuliers.

La plupart des codes de simulation calculent en réalité la gravité par des méthodes plus rapides qui, au prix de légères approximations, autorisent un plus grand nombre de particules, donc une haute résolution. Les deux techniques principales, le *treecode* et les « codes sur grille », permettent d'accélérer le calcul des forces gravitationnelles en ne demandant que $N(\log N)$ calculs de distance.

• Le *treecode*, ou « code en arbre », conçu de manière adaptative, sert à résoudre l'interaction d'autant mieux que les particules s'avèrent proches. La figure 1 montre la distribution spatiale de quelques

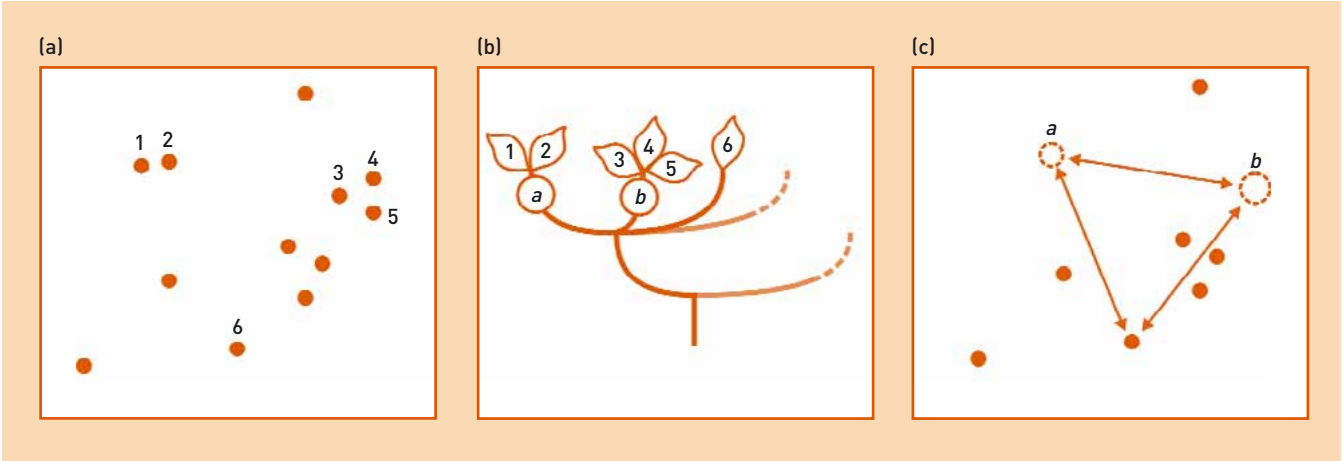


Figure 1.
Les particules représentant une distribution de corps massifs (par exemple des étoiles) sont regroupées en plus proches voisins à l'extrémité de la structure en arbre d'un *treecode*, ici détaillée pour les particules 1 à 6. Leurs interactions mutuelles sont calculées de manière exacte, puis elles sont regroupées en pseudo-particules (ici *a* et *b*) pour calculer les interactions à plus grande distance.

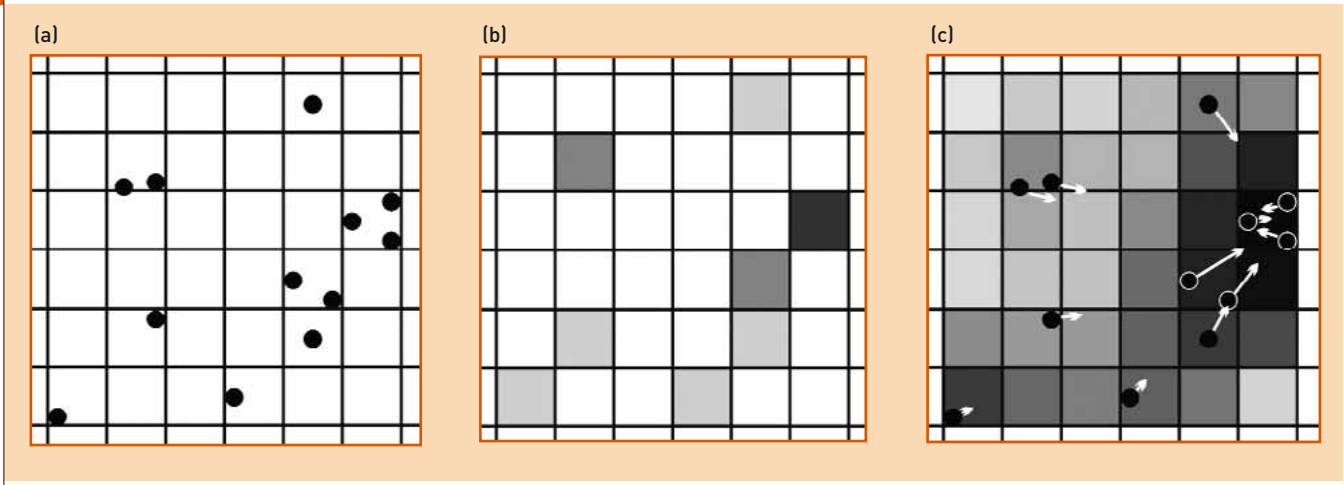


Figure 2.
La même distribution de particules est ici traitée dans un code sur grille (a). L'opération de fusion des particules sur la grille aboutit au calcul de la densité de masse (b, représentée par les niveaux de gris). La résolution de l'équation de Poisson permet de calculer le potentiel gravitationnel (grille c) à partir de la densité, puis la force gravitationnelle subie par chaque particule en fonction de la position sur la grille du potentiel.

particules numériques. Une structure « en arbre » se construit dans la mémoire de l'ordinateur pour regrouper « les plus proches voisins ». Sur cette figure, deux feuilles d'une même branche de l'arbre représentent les particules 1 et 2. Leur interaction gravitationnelle se calcule de manière exacte (aux arrondis informatiques près), c'est-à-dire proportionnellement à chacune de leur masse et inversement proportionnelle au carré de leur distance. L'interaction entre les particules 3, 4 et 5 se traite aussi de manière exacte. En revanche, concernant des particules plus éloignées les unes des autres, l'estimation des interactions se simplifie afin d'accélérer le calcul. Si l'on descend d'un niveau sur l'arbre, les particules 1 et 2 sont remplacées par une seule particule *a*, dont la masse revient à la somme des deux et se place au centre de gravité. La particule distante 6 subit une seule force, celle exercée par la pseudo-particule *a*, au lieu des deux forces exercées indépendamment par les particules 1 et 2. De même, le groupe de particules 3, 4 et 5 est remplacé par une autre pseudo-particule *b*, au même niveau que *a* sur l'arbre. Il suffit donc de calculer une seule force exercée par la particule *b* sur la particule *a*, au lieu des six forces exercées par chacune des particules 3, 4 et 5 sur les particules 1 et 2 individuellement.

Le regroupement des particules selon les niveaux de l'arbre n'entraîne pas forcément une dégradation de précision. Certes, l'interaction gravitationnelle entre les pseudo-particules *a* et *b* reste une approximation de la réalité, cependant elle demeure fiable en cas d'application à des particules suffisamment éloignées. Mais surtout, le gain en temps de calcul permet d'augmenter le nombre de particules entrant dans la simulation et donc la précision du modèle. Ainsi, une **galaxie** spirale contient cent milliards d'étoiles dans un disque de 10 **kiloparsecs** de rayon. Un calcul exact de toutes les interactions limiterait le nombre de particules à environ dix mille et la **résolution** du modèle (distance entre particules proches) ne serait que de 200 parsecs. L'emploi d'un code en arbre permet, à temps de calcul égal, de modéliser le **disque** à l'aide d'un à dix millions de particules, autorisant des résolutions spatiales de l'ordre d'une dizaine de parsecs.

Le grand avantage du *treecode* réside dans sa conception adaptative. Le calcul des interactions étant plus fin à petite distance, la résolution devient optimale pour suivre les structures denses et massives. En revanche, ce code ne figure pas parmi les meilleurs pour modéliser la formation de nouvelles structures dans des régions qui ne sont pas déjà denses. Pour cette raison, les simulations de formation des structures s'intéressent souvent à d'autres codes, dits de « particules sur grille ».

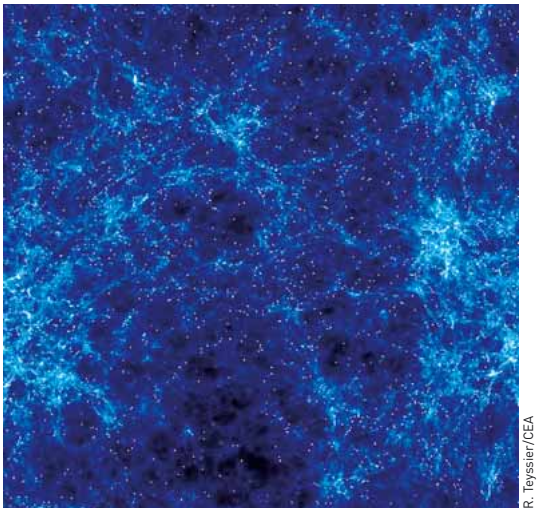
• Les codes dits de « particules sur grille » découpent l'espace simulé à l'aide d'une grille (figure 2). Dans sa version la plus simple, celle-ci se présente comme étant cartésienne et de résolution uniforme, c'est-à-dire que toutes les cellules y sont cubiques et de même taille. Les particules fusionnant sur cette grille, la première étape de l'opération consiste à compter le nombre de particules présentes dans chaque cellule – en réalité, les particules positionnées au bord d'une cellule sont partiellement attribuées aux cellules voisines pour accroître la précision du calcul. Une fois cette étape réalisée, la grille donne la densité de masse dans l'espace simulé. La résolution de l'**équation de Poisson**(1) indique que le potentiel gravitationnel s'obtient par la convolution de cette densité par la fonction universelle *1/r*, où *r* représente la distance d'une cellule à une autre. Plusieurs calculs de cette convolution sont possibles en fonction de la forme de la grille. Sur une grille cartésienne, la technique la plus rapide consiste à effectuer la **transformée de Fourier**(2)

(1) Siméon-Denis Poisson (1781-1840), mathématicien, géomètre et physicien français qui a réalisé d'importants travaux sur l'électricité et le magnétisme qu'il contribua à fonder. En astronomie, il a essentiellement étudié l'attraction des planètes.

(2) Joseph Fourier (1768-1830), mathématicien et physicien français, connu pour ses travaux sur la décomposition de fonctions périodiques en séries trigonométriques convergentes appelées séries de Fourier.

de la densité : dans l'espace transformé, la convolution se réduit à un produit classique, puis la transformée inverse indique la valeur du potentiel gravitationnel dans chaque cellule de la grille. Connaissant, à ce stade, le potentiel gravitationnel sur la grille entière, le code calcule la force gravitationnelle qui s'exerce sur chaque particule puis en déduit l'avancement des particules à chaque pas de temps. La résolution spatiale d'une telle simulation est relative à la taille des cellules. Dans les **algorithmes** élaborés, la grille peut être « raffinée », en recoupant les cellules les plus intéressantes en unités plus petites. Pour « raffiner » les régions les plus denses, il faut procéder comme dans un *treecode*, mais aussi selon tout autre critère lié à la question étudiée (régions les plus froides, présence de **chocs**...).

Les codes sur grille offrent encore un autre avantage, celui de pouvoir incorporer une composante de gaz diffus, par exemple le gaz interstellaire d'une galaxie. Une telle composante suit les équations de l'hydrodynamique et ne se représente plus par des particules mais par une masse diffuse contenue dans chaque cellule. La gravité, calculée sur la grille, s'applique à cette masse tandis que diverses techniques résolvent les équations hydrodynamiques. À titre d'exemple, la formation des plus grandes structures de l'Univers (amas de galaxies et les filaments cosmologiques) s'étudie, avec succès, à l'aide des codes à particules sur grille (figure 3). Les simulations cosmologiques utilisent les fluctuations de densité de l'Univers **primordial**, observées dans le rayonnement fossile à 3 degrés K. Elles calculent l'amplification de ces fluctuations sous l'effet de leur propre gravité et de l'expansion de l'Univers. Ainsi, pour tester le scénario cosmologique standard, on compare les propriétés statistiques des galaxies (distribution spatiale, masse) avec les observations.

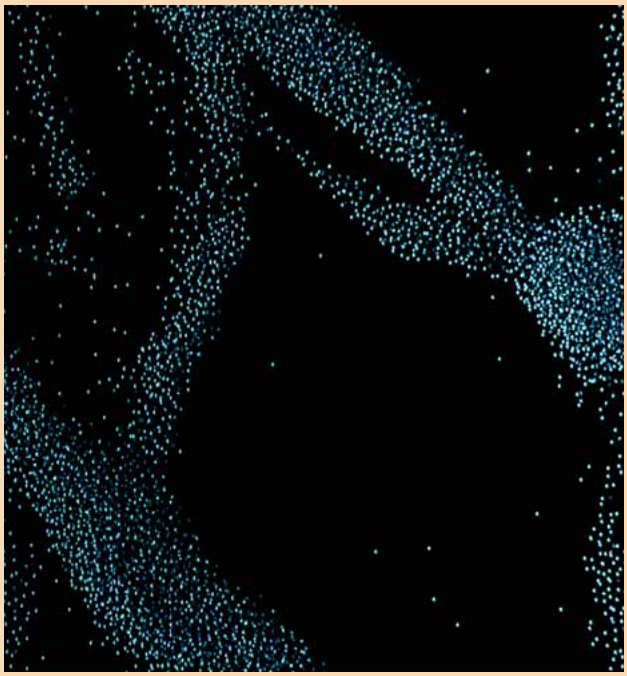


R. Teyssier/CEA

Figure 3.
Une simulation cosmologique de la formation des grandes structures de l'Univers. La simulation montre l'état de l'Univers après environ 3 milliards d'années d'évolution dans une boite de 50 mégaparsecs de côté. À cette échelle, la matière noire domine largement la masse de l'Univers. Son interaction, purement gravitationnelle, est modélisée à l'aide d'un code à « particules sur grille » et une grille raffinée, qui permet de suivre la formation des filaments cosmologiques et des amas de galaxies. Les plus petites structures visibles sur l'image correspondent aux halos de matière noire dont chacun contient une galaxie.

Particules et collisions

Les interactions entre les particules de l'Univers se trouvent principalement régies par la gravité. Pour la **matière noire**, il s'agit même de la seule interaction possible. On considère qu'il n'existe pas d'autre force (à courte portée) pour décrire les trajectoires de ces particules étranges. Cette matière noire se présente comme un fluide dit « non collisionnel » tout comme les **étoiles** d'une **galaxie**, tellement éloignées les unes des autres (par rapport à leur taille), qu'elles n'entrent presque jamais en collision. La **modélisation** passe par l'**équation de Vlassov-Poisson**. En revanche, certains systèmes comme les nuages de gaz (**nébuleuses**) d'une galaxie ou les **planétésimaux** d'un **disque** protoplanétaire, montrent des dimensions propres non négligeables par rapport à la séparation de l'un avec l'autre. Ces objets cosmiques entrent en collision mutuelle à un rythme qui modifie la trajectoire de chacun. Ensuite, leur destin varie. Dans une galaxie, les nuages interstellaires rebondissent entre eux selon des collisions inélastiques qui dissipent une partie de l'énergie cinétique ; les planétésimaux d'un disque protostellaire s'agglomèrent en objets de taille croissante. La simulation numérique des anneaux de Saturne (figure 4) illustre l'évolution d'un système de corps gravitants et collisionnels. Les particules numériques modélisent les planétésimaux qui constituent les anneaux. Ils interagissent par gravité, peuvent s'agglomérer par collisions. Ils peuvent aussi fragmenter un gros corps en plusieurs autres plus petits. La gravité façonne des **ondes dites de Jeans** qui se propagent dans les anneaux et engendrent une morphologie filamentaire. Les propriétés observables des anneaux sont modifiées et se prédisent par ces simulations numériques.



S. Charnoz/CEA/Université de Paris Diderot et F. Durillon/Animea.

Figure 4.
Une simulation de la structure des anneaux de Saturne à l'échelle de quelques dizaines de mètres. Les particules numériques interagissent par gravité, et par collisions mutuelles.

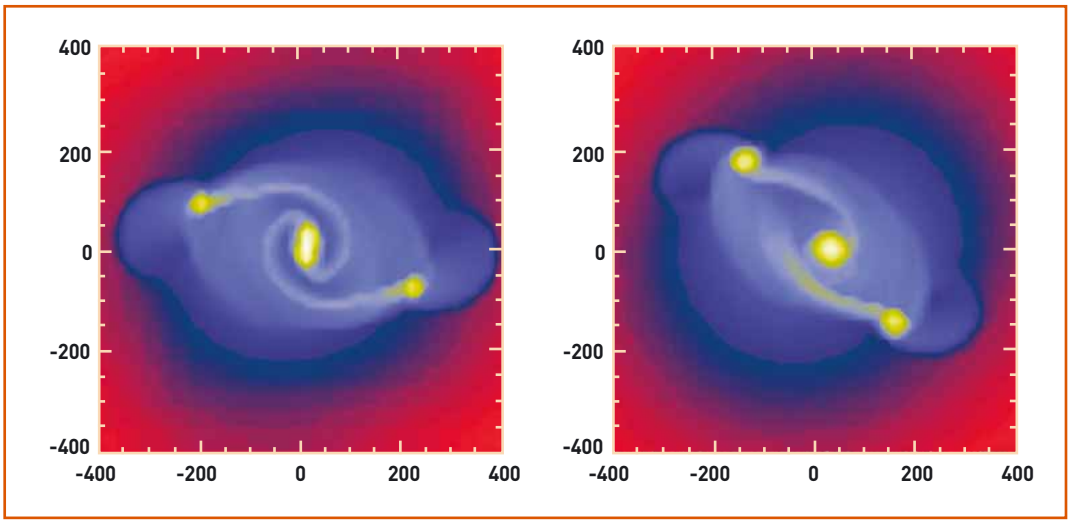


Figure 5.
La formation d'un système protostellaire au sein d'un nuage moléculaire, avec un code AMR à gauche, et un code SPH à droite.(Les distances sont en unités astronomiques : une unité astronomique équivaut à la distance entre la Terre et le Soleil, soit 150 millions de kilomètres).

L'hydrodynamique

La matière ordinaire (environ 15 % de la masse totale dans l'Univers) se spécifie d'être fortement collisionnelle et les interactions à courte portée dominent la dynamique des atomes d'**hydrogène** et d'**hélium**. Les collisions y sont tellement nombreuses que le **plasma** s'établit à un équilibre thermodynamique local. Aujourd'hui, les chercheurs savent décrire ce système grâce aux **équations d'Euler**[3]**-Poisson** qui entérinent le règne des chocs et de la mécanique des fluides. Il s'agit des mêmes équations-modèles qu'utilisent les ingénieurs de l'aérospatiale pour étudier l'écoulement des fluides autour des avions ou les climatologues pour la physique de l'atmosphère. Quant aux astrophysiciens, ils ont poussé plus loin l'exercice en proposant une technique originale, baptisée *Smooth Particle Hydrodynamics* (SPH), capable de simuler la mécanique des fluides à l'aide de particules. Son atout réside dans sa nature « **lagrangienne** », c'est-à-dire que les points d'échantillonnage du fluide sont des particules se déplaçant avec l'écoulement.

Par ailleurs, la présence de la gravité dans la matière ordinaire, fait qu'elle se concentre souvent dans de petits volumes très denses. Pour l'étudier, les astrophysiciens utilisent encore les techniques classiques de l'hydrodynamique, même si la résolution du maillage ne leur permet pas d'atteindre les toutes petites échelles. Mais depuis le début des années 1990, une nouvelle technique a révolutionné la discipline. Il s'agit du maillage adaptatif, en anglais *Adaptive Mesh Refinement* (AMR), qui permet à la grille de calcul de s'adapter dynamiquement aux propriétés de l'écoulement en ajoutant des mailles, aux endroits stratégiques du calcul, notamment dans les régions denses aux petites échelles. L'AMR allie donc deux avantages : l'adaptabilité de la méthode SPH ainsi que la précision et la stabilité des méthodes sur grilles. Des études récentes ont effectivement démontré que la méthode SPH, dans sa version courante, ne peut décrire correctement des processus hydrodynamiques tels que l'**instabilité de Kelvin-Helmholtz**[4]. Les méthodes à base de grilles, par exemple les codes AMR, ne connaissent pas ces limites. En revanche, concernant les écoulements froids en rotation que l'on trouve notamment dans les galaxies, la méthode SPH peut s'avérer plus efficace que les codes AMR. La bonne stratégie consiste donc à utiliser et comparer les deux méthodes aussi souvent que possible. Lorsque les résultats s'accordent, la crédibilité du modèle s'en trouve naturellement renforcée. Ce fut le cas récemment lors de l'observation d'un effondrement de nuage moléculaire (figure 5). En revanche, cette crédibilité devient moins probante en cas d'ajout d'autres processus physiques – par exemple les fluides magnétisés et l'hydrodynamique radiative.

> **Frédéric Bournaud** et **Romain Teyssier**
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles
(CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

(3) Leonhard-Paul Euler (1707-1783), mathématicien et physicien suisse, qui a fait d'importantes découvertes en matière de calcul infinitésimal, de théorie des graphes, en mécanique et dynamique des fluides pour l'astronomie.

(4) William Thomson, mieux connu sous le nom de Lord Kelvin, (1824-1907), physicien britannique reconnu pour ses travaux en thermodynamique, et Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894), physiologiste et acousticien, professeur d'anatomie et de physiologie, puis de physique à Berlin.

POUR EN SAVOIR PLUS

R. Teyssier ; S. Fromang ; E. Dormy, *Kinematic dynamos using constrained transport with high order Godunov schemes and adaptive mesh refinement*, 2007, JCP, 218, 44.

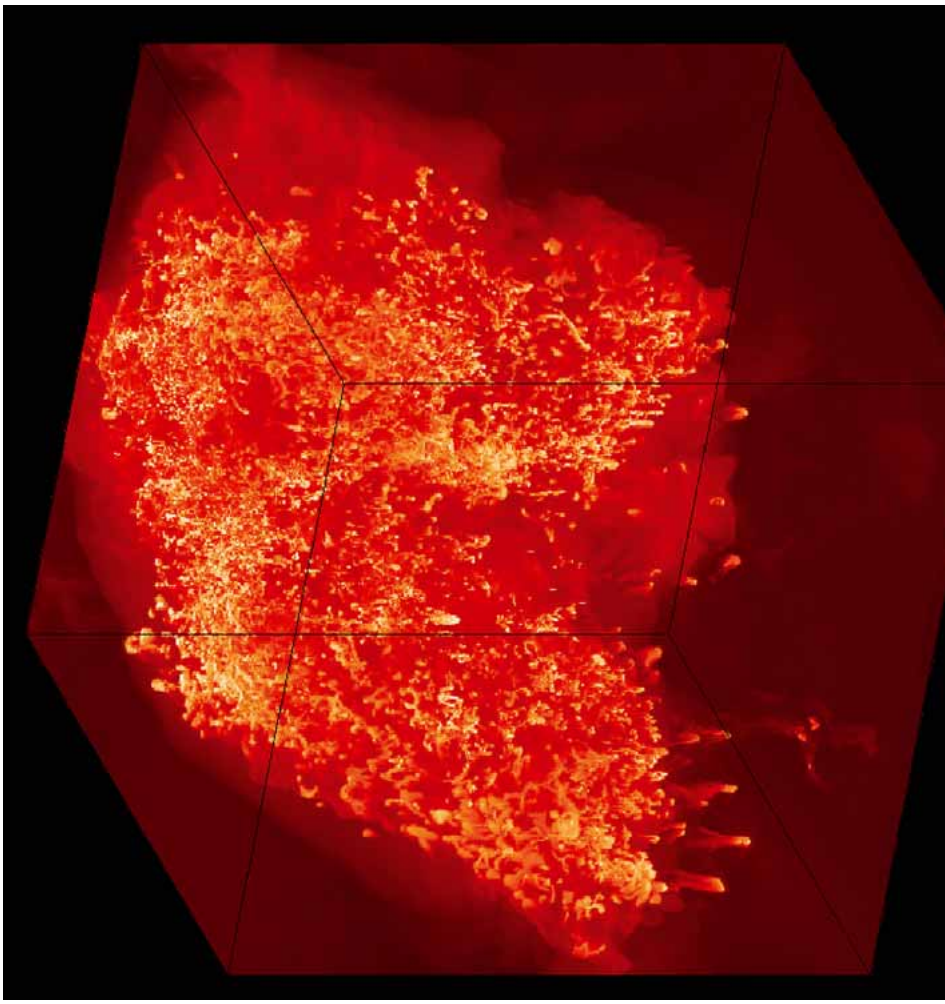
Le rayonnement

Le transfert **radiatif** est le domaine de la physique qui décrit la propagation et les interactions des photons avec la matière. La presque totalité des informations sur les astres nous parvenant sous forme de lumière, la communauté des astrophysiciens s'implique fortement dans le traitement du transfert radiatif pour comprendre l'émission de photons et leur propagation jusqu'à nous. Il s'agit donc d'un outil puissant, capable de diagnostiquer les conditions physiques au sein des astres (densité, pression, température, composition chimique). Ce qui ne veut pas dire que le **rayonnement** doive être seulement considéré comme un élément passif pour le diagnostic. Il s'agit également d'un acteur dynamique important qu'il faut prendre en compte pour reproduire la formation et l'évolution des systèmes astrophysiques. Aujourd'hui, grâce à la puissance croissante des ordinateurs, de nouvelles méthodes voient le jour, permettant de coupler dynamiquement le transfert radiatif et l'hydrodynamique. Cet article présente, de manière schématique, les méthodes numériques relatives au transfert radiatif.

Vu leur nombre, il reste impossible de décrire les photons pris individuellement. Il faut passer par leur fonction de distribution : $I(x,t,n,\upsilon)$. Dans cette fonction, I correspond au nombre de photons par unité de volume au point x, au temps t, ayant une direction de propagation n et une fréquence υ. L'équation du transfert radiatif détermine l'évolution, dans le temps et dans l'espace, de la fonction de distribution : en l'absence de matière, les photons se propagent en ligne droite mais s'ils rencontrent de la matière, ils peuvent se voir absorbés ou diffusés dans une autre direction tandis que la matière émet alors de nouveaux photons. L'équation du transfert indique alors que la variation du nombre de photons se propageant suivant une direction équivaut au nombre de photons émis ou diffusés par la matière dans cette direction, moins le nombre de photons absorbés ou diffusés dans une autre direction.

En théorie, suivre l'évolution de la fonction de distribution ne présente pas de difficulté. Mais en pratique, il s'agit d'un problème véritablement délicat et coûteux en temps de calcul. En effet, en plus du facteur temps, la fonction de distribution dépend d'autres paramètres : trois pour la position *x*, deux pour déterminer la direction *n* et un autre pour la fréquence υ. Échantillonner chaque paramètre avec N points, suppose alors que la grille de simulation comporte N^6 éléments, ce qui devient rapidement impossible pour des valeurs « raisonnables » de N. À titre de comparaison, pour une simulation hydrodynamique, il faut seulement N^3 éléments pour échantillonner chaque variable. Mais au regard de ces difficultés, inhérentes à la résolution de l'équation du transfert, de nombreuses approches simplificatrices se développent. La plus simple d'entre elles suppose un milieu complètement transparent – le cas de nombreux systèmes astrophysiques où la densité de gaz s'avère très faible. Dans cette hypothèse, un photon émis s'échappe du système sans interagir avec la matière. Connaître ou calculer sa trajectoire devient inutile puisqu'il suffit de prendre en compte la perte d'énergie correspondante pour le gaz. Dans ce cas, les chercheurs parlent plutôt de refroidissement que de transfert radiatif. Sur le plan technique, il faut ajouter, dans l'équation sur l'énergie du gaz, un terme qui permet de prendre en compte tous les processus d'émission du gaz à l'origine de la perte d'énergie. En présence de molécules ayant de nombreuses raies d'émission, il peut s'agir de processus complexes. La figure 1 présente une carte de densité issue d'une simulation du milieu interstellaire. Les petites structures denses (les plus claires) résultent d'un refroidissement plus intense qui a baissé l'énergie interne, et donc la pression, dans ces régions ensuite comprimées par le milieu extérieur. Ce processus de fragmentation par instabilité thermique marque une étape importante dans la formation des cœurs protostellaires, notamment parce qu'il fixe leur masse.

Mais au fur et à mesure qu'elle se densifie, la matière devient opaque au rayonnement, ce qui empêche de partir du postulat de la transparence du milieu – il s'agirait d'une très mauvaise approximation. Une solution existe pour étendre la méthode précédente à des régions optiquement épaisses, tout en conservant une technique numérique simple : elle consiste à supprimer le refroidissement radiatif au-delà d'un certain seuil en densité. C'est notamment ce qui est



CEA

Figure 1.
Carte de densité d'une simulation du milieu interstellaire. Le domaine de simulation fait environ 50 années-lumière. Les petites structures denses (les plus claires) se sont formées par l'instabilité thermique due au refroidissement. Ce sont des cœurs denses dans lesquels se forment les étoiles.

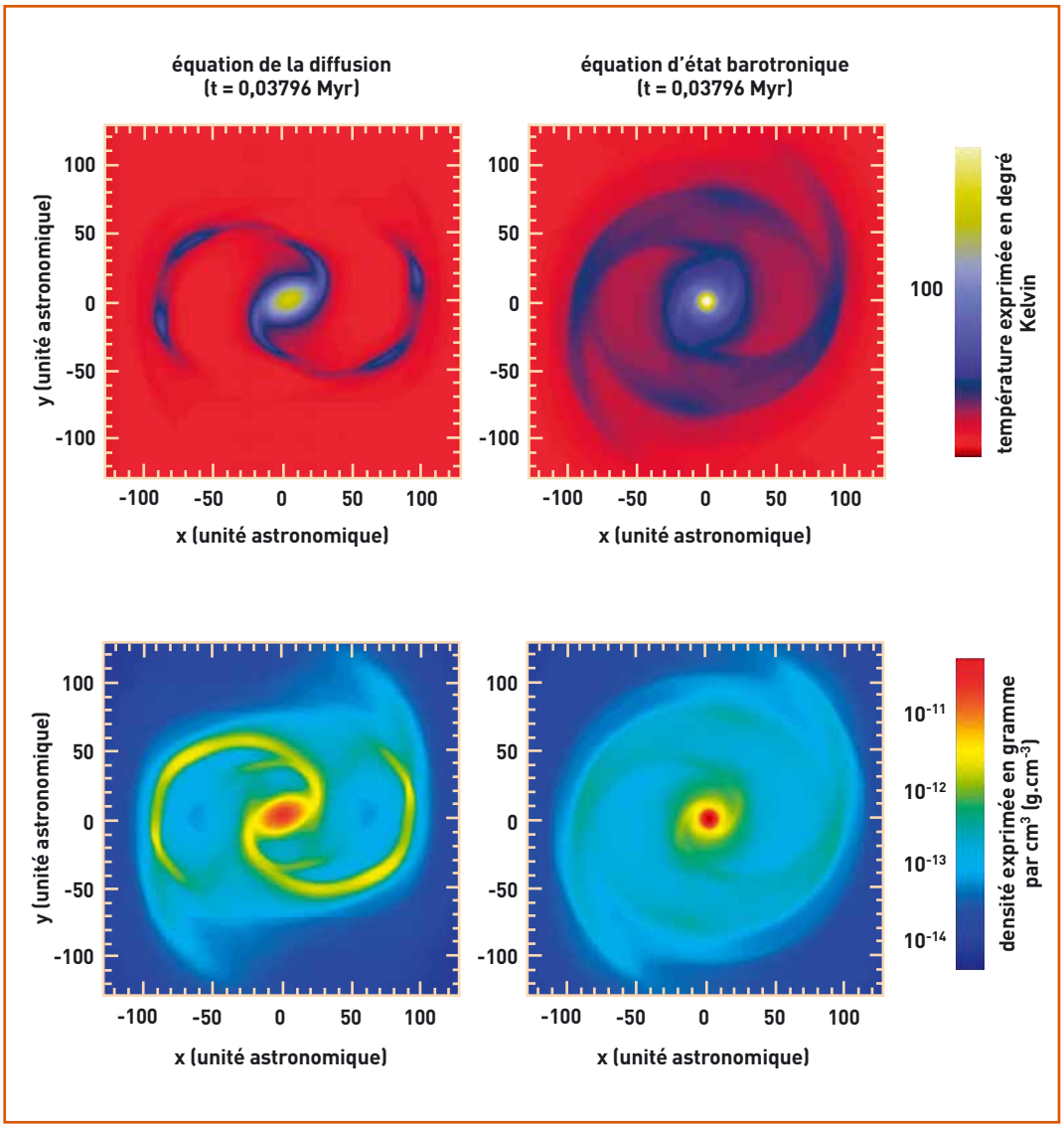


Figure 2.
Simulation de la formation et de la fragmentation d'un cœur dense proto-stellaire. Les deux figures de gauche ont été obtenues en utilisant, pour le transfert, l'approximation de la diffusion ; alors que, pour les figures de droite, c'est une équation d'état barotropique qui a été utilisée. Les deux figures du haut montrent des cartes de température et celles du bas des cartes de densité. L'unité astronomique correspond à la distance entre la Terre et le Soleil (150 millions de km) et t = 0,037 96 millions d'années.

fait quand on utilise une **équation d'état barotropique** où le gaz, isotherme à basse densité, devient **adiabatique** au-delà d'un « seuil en densité ». Généralement, celui-ci se calcule en déterminant, sur des simulations monodimensionnelles avec transfert radiatif, la densité à partir de laquelle la structure devient opaque, ce qui dépend de nombreux paramètres. Les images de la figure 2 (colonne droite) montrent une simulation de la fragmentation d'un **disque protostellaire**, réalisée avec une équation d'état barotropique.

Si elles présentent l'avantage de la simplicité, les approches précédentes laissent néanmoins apparaître une lacune : elles ne transportent pas l'énergie, laquelle, si elle peut rayonner hors du système étudié, ne peut se transporter d'une région à une autre de ce système. Retrouver cet aspect important du transfert radiatif suppose des méthodes, plus complexes et plus proches de l'équation du transfert. Pour éviter l'équation complète du transfert, trop lourde numériquement, la solution consiste à utiliser des moyennes angulaires de la fonction de distribution des **photons** dites « moments de la fonction de distribution ». Le moment d'ordre 0 correspond à l'énergie radiative, le moment d'ordre 1 au flux radiatif, le moment d'ordre 2 à la pression radiative, etc. À partir de l'équation du transfert, il devient alors possible d'écrire les équations d'évolution de ces moments. Ces équations, proches de celles utilisées par l'hydrodynamique, relient la dérivée temporelle du moment d'ordre n à la divergence du moment d'ordre n+1. Il s'avère donc impossible d'intégrer directement cette hiérarchie d'**équations aux moments** puisque, pour déterminer l'évolution temporelle d'un moment, il faut connaître le moment suivant. Il devient donc indispensable d'opérer des approximations physiques et d'introduire une relation de fermeture pour relier un moment à ceux d'ordres inférieurs. Le plus simple

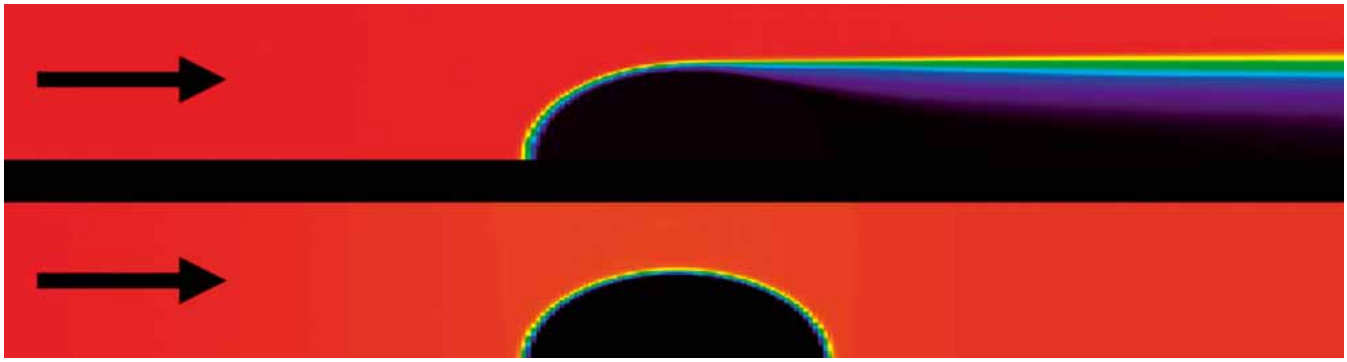


Figure 3.
Simulation d'un conduit transparent dans lequel du rayonnement arrive de la gauche (flèche) et rencontre un obstacle opaque (ovale noir). En haut, avec le modèle M1, l'ombre derrière l'obstacle est bien préservée. En revanche, en bas, avec l'approximation de la diffusion, le rayonnement qui se propage selon les gradients de température remplit la zone d'ombre.

des modèles consiste à garder seulement l'équation sur l'énergie radiative (moment d'ordre 0). La relation de fermeture est ensuite obtenue en supposant que la dérivée temporelle du flux soit nulle. Cette opération permet d'obtenir une équation uniquement sur l'énergie radiative. Ce modèle, exact pour les milieux optiquement épais, s'appelle approximation de la diffusion. Avec lui, l'énergie radiative est transportée d'un point à un autre en suivant les gradients de température. Les deux images de la figure 2 (colonne gauche) présentent une simulation de fragmentation d'un disque protostellaire utilisant cette approximation de la diffusion. Celle-ci donne des résultats sensiblement différents à ceux obtenus au moyen d'une équation d'état barotropique : par exemple, les bras spiraux sont plus marqués. L'approximation de la diffusion constitue donc une avancée considérable comparée à l'équation d'état barotropique.

Néanmoins, il peut être utile de recourir à des modèles un peu plus complexes en conservant deux équations aux moments (sur l'énergie et le flux radiatif) au lieu d'une seule. Pour ce type de modèle, il faut une relation de fermeture permettant de calculer la pression radiative en fonction de l'énergie et du flux radiatif. C'est, par exemple, le cas du modèle dit M1 qui calcule la pression radiative en minimisant l'entropie du rayonnement. Le principal intérêt de M1 réside en ce que le flux radiatif ne s'aligne plus systématiquement avec le gradient de température, d'où la préservation des ombres (figure 3).

En simplifiant considérablement l'équation du transfert, ces modèles aux moments ramènent à un système d'équations voisin de celui de l'hydrodynamique. Néanmoins, le fait que la vitesse de la lumière soit élevée (notamment par rapport à la vitesse des fluides étudiés) implique des temps caractéristiques liés au rayonnement extrêmement petits. D'où la nécessité d'intégrer, en temps de manière implicite, le transfert de rayonnement. Il s'agit d'une opération qui impose de résoudre un système linéaire couplant l'ensemble des points de la **simulation numérique**. Outre un coût élevé en calcul, cette résolution nécessite des **algorithmes** dédiés et sophistiqués qui soient efficaces sur des ordinateurs « massivement parallèles ».

Enfin, si nécessaire (et si possible !), l'équation du transfert doit se résoudre par un minimum d'approximations physiques. C'est notamment le cas lorsqu'il s'agit d'établir des comparaisons fines avec certaines observations. La figure 4 correspond à un calcul de transfert radiatif dans un disque de poussière, autour d'une **étoile** binaire. Afin de résoudre l'équation du transfert exactement, tout

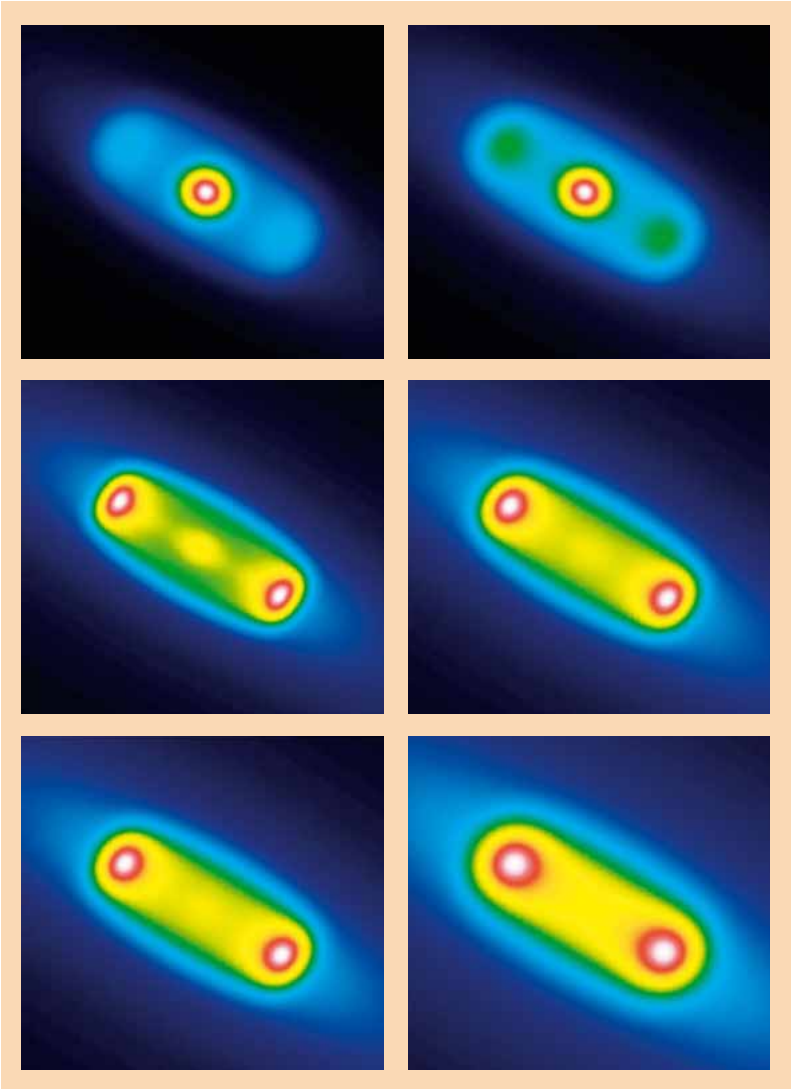


Figure 4.
Images simulées dans différentes longueurs d'onde d'un disque de poussière autour d'une étoile binaire. Ces images peuvent ensuite être directement comparées aux observations.

en gardant un coût numérique acceptable, on a supposé que le **disque** était à **symétrie cylindrique**. Avec cette approximation géométrique, il est possible de calculer le transfert radiatif dans le disque, en prenant notamment en compte les propriétés radiatives complexes des poussières qui le constituent.
Qu'elles soient simples ou complexes, il existe donc de nombreuses méthodes de **modélisation** du transfert radiatif. Le rôle du physicien consiste ensuite à cerner, au mieux, les propriétés physiques essentielles et nécessaires à l'étude de son problème pour, finalement, choisir le meilleur compromis entre les contraintes techniques et numériques, et les nécessités physiques.

> Édouard Audit
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles
(CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Le magnétisme

Dans l'Univers, le **champ magnétique** est omniprésent. Pour en comprendre son origine et son influence sur l'évolution des objets célestes, les chercheurs du CEA développent des programmes numériques performants capables de suivre l'évolution et la génération du champ magnétique dans des objets aussi variés que les **étoiles**, les **disques d'accrétion** ou les **galaxies**. Il s'agit d'un des enjeux majeurs de l'astrophysique du XXIe siècle.
L'Univers étant principalement constitué de gaz ionisé (autrement dit de plasma, quatrième état de la matière), les effets du champ magnétique se font sentir dans la plupart des objets célestes puisque les courants électriques peuvent y circuler librement. Par exemple, sur Terre, le champ géomagnétique agit sur les aiguilles des boussoles en les orientant vers le Nord géographique qui, en fait, se trouve être le pôle Sud magnétique. Mais dans le **Soleil**, où il s'avère 1000 fois plus intense que sur Terre, le champ magnétique prend, tour à tour, la forme de points brillants, de taches solaires ou de protubérances. Dans les galaxies, on peut également observer un champ ambiant de quelques micro**Gauss**, principalement le long des bras spiraux. Enfin, l'interaction entre deux structures cosmiques magnétisées s'avère également très instructive sur le rôle joué par le champ magnétique dans l'Univers – par exemple, dans le cas d'un système étoile/**planète** ou d'un objet central avec un disque de matière orbitant autour de cet objet. D'où, l'incise d'Eugene Parker(1) dans *Cosmic Magnetic Fields* où il écrit : « *Les champs magnétiques sont communs dans les laboratoires, et même dans les maisons, où leurs propriétés sont bien connues. Avec les grandes échelles présentes dans l'Univers, cependant, le champ magnétique joue un rôle particulier, assez différent de celui qu'il joue dans les laboratoires. Le champ magnétique se comporte dans l'Univers comme un "organisme", se nourrissant des mouvements créés par les étoiles et galaxies.* » C'est donc à cause de l'énorme taille caractéristique des conducteurs cosmiques(2) que les courants électriques qu'ils contiennent sont déterminés par le mouvement du plasma plutôt que par la conductivité électrique. La **force de Lorentz**, associée au champ magnétique qui en résulte, agit directement sur les mouvements du plasma. On peut décomposer l'effet de cette force en une composante reliée à un gradient de pression magnétique perpendiculaire aux lignes de champ magnétique, et en une autre, reliée à la tension des lignes, le long desquelles les **ondes d'Alfvèn** se propagent. En raison de la longueur de l'échelle de temps cosmologique, la force de Lorentz, bien que petite par rapport à la **gravité** à ces grandes échelles, produit des effets systématiques et importants.

• Origine du magnétisme : batterie de Biermann et effet dynamo.

L'Univers baigne dans un champ magnétique infinitésimal. Son origine est liée à l'existence de gradients

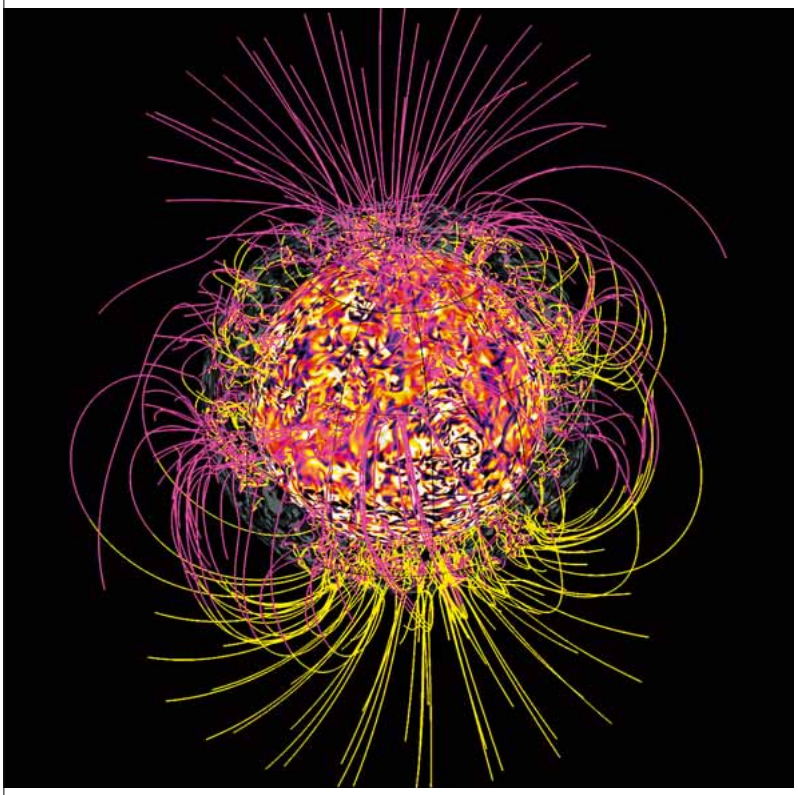


Figure 1.
Ligne de champ magnétique dans, et hors de la zone convective solaire. En violet, les zones dirigées vers le Soleil et en jaune celles dirigées vers l'observateur.

(1) Eugene Parker (né en 1927), astrophysicien américain qui a développé la théorie du vent solaire, prédit la forme spiralée du champ magnétique à l'intérieur du système solaire, démontré que la couronne solaire se constituait d'une multitude de minuscules éruptions solaires couvrant la totalité de la surface du Soleil.

(2) Leur nombre de Reynolds magnétique (Rm = *VL*/eta) est gigantesque. Dans cette équation, *V* et *L* représentent la vitesse et la longueur caractéristique du système ; eta étant la diffusivité magnétique (inversement proportionnelle à la conductivité du plasma).

de densité et de pression électroniques non alignés dont l'association crée des sources de champ magnétique : c'est le phénomène dit de la batterie de Biermann[3]. Pour amplifier le champ magnétique vers des valeurs plus élevées (de quelques micro à plusieurs centaines de milliards de Gauss comme dans les objets compacts), on peut soit le comprimer (par la conservation du flux magnétique, l'amplitude du champ croit avec la réduction de la taille du système), soit l'amplifier *via* l'action d'une dynamo fluide. À titre de comparaison, prenons l'exemple d'une dynamo installée sur un vélo pour convertir l'énergie mécanique fournie par une personne pédalant, en énergie électrique, par exemple, pour allumer l'ampoule d'un phare. Pour les objets célestes, il existe un principe équivalent capable de transformer l'énergie cinétique en énergie magnétique. Ce principe dépend du mouvement du plasma composant ces objets célestes. On lui a donné le nom de « dynamo fluide ». Selon toute vraisemblance, il serait à l'origine du magnétisme de la Terre, de Jupiter, du Soleil, de certaines étoiles et des galaxies.

• Méthodes numériques et contrainte de conservation du flux magnétique.

Étudier le magnétisme des objets cosmiques nécessite l'utilisation d'une équation dynamique décrivant l'évolution du champ magnétique : il s'agit de l'équation d'induction[4]. Des solutions analytiques existent pour résoudre cette équation dans certaines configurations magnétiques simples. Mais la plupart des problèmes liés au magnétisme cosmique nécessitent le développement de programmes numériques multidimensionnels (2-D ou 3-D) pour résoudre cette équation et son comportement complexe. Ces dernières années, les chercheurs du CEA ont donc développé des programmes capables d'y parvenir, par approximation numérique. Ceci consiste à coupler l'équation d'induction, de manière non linéaire, aux équations de la mécanique des fluides. C'est le cas des programmes RAMSES, Heracles, ASH (pour *Alelastic Sperical Harmonic*). De nombreuses techniques numériques existent pour donner une approximation numérique à un système d'équations aux dérivées partielles (EDP) : par exemple, les différences finies, les méthodes spectrales, les éléments finis ou spectraux.

De plus, deux difficultés supplémentaires surgissent quand il s'agit de modéliser un plasma magnétisé et de comprendre l'évolution de son champ magnétique : la première vient de la conservation du flux magnétique découlant directement des équations de Maxwell[5] et la seconde de la présence d'ondes spécifiques telles que les ondes transverses incompressibles d'Alfvèn. Le Service d'astrophysique du CEA a exploité les différences finies sur grilles et les méthodes spectrales afin de traiter, le plus précisément possible, les équations de la **magnétohydrodynamique** (MHD). Les méthodes grilles présentent l'avantage d'une mise en œuvre simple car les équations sont directement projetées sur la grille de calcul. De plus, elles s'avèrent flexibles puisque l'on peut toujours ajouter de nouveaux points de grille, en cours d'évolution (d'où le terme de grille adaptative), pour améliorer la précision numérique du calcul et pouvoir ainsi capturer les chocs. En revanche, elles sont d'une précision limitée en fonction de l'ordre du

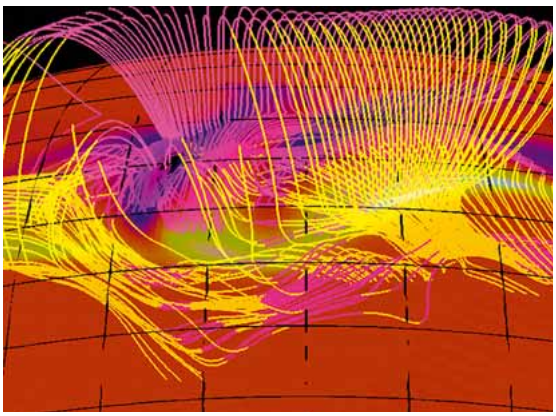


Figure 2.
Émergence d'un tube de flux magnétique à la surface d'une simulation du magnétisme solaire illustrant l'apparition des taches solaires. On remarque la connectivité des lignes de champ magnétique entre l'intérieur et la basse couronne, la surface étant représentée par la grille semi-transparente (en jaune la ligne est dirigée vers le lecteur et en mauve vers l'étoile).

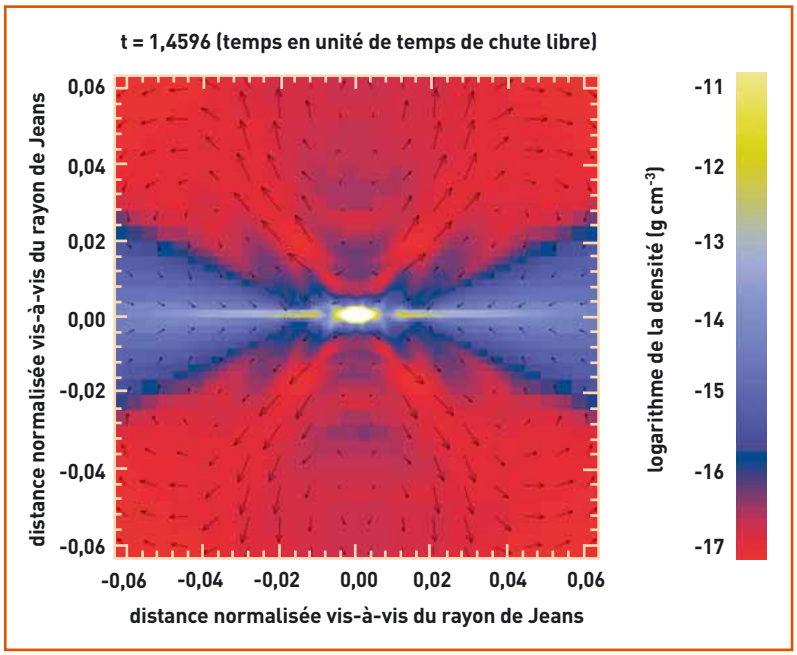


Figure 3.
Formation d'un disque circumstellaire par effondrement gravitationnel d'un nuage de gaz ionisé baigné d'un champ magnétique.

(3) Ludwig Biermann (1907-1986), astronome allemand qui a étudié les queues des comètes et leurs interactions avec le vent solaire. Il a également contribué à la physique des plasmas, notamment à l'étude de la chromosphère et de la couronne solaire.

(4) Cette équation dérive des équations de Maxwell et de la loi d'Ohm. Comme pour celles-ci, il s'agit d'une équation aux dérivées partielles vectorielles :
$\delta B/\delta t = \mathrm{Rot}\ x\ (u\ x\ B) - \mathrm{Rot}\ x\ (\mathrm{eta}\ \mathrm{Rot}\ x\ B)$. Le premier terme représente l'advection, le cisaillement et la compression du champ magnétique par les mouvements du plasma ; le second, sa dissipation par l'effet Joule (« B » correspond au champ magnétique, « u » au champ de vitesse, « Rot » le rotationnel d'un vecteur, « x » le produit vectoriel et « δ/δt » la dérivée partielle en fonction du temps.

(5) James Maxwell (1831-1879) : physicien et mathématicien écossais connu pour avoir unifié en un seul ensemble d'équations, les équations de Maxwell, l'électricité, le magnétisme et l'induction, en incluant une importante modification du théorème d'Ampère.

développement utilisé pour évaluer numériquement les dérivées et autres gradients présents dans les systèmes d'EDP/MHD. Au contraire, l'intérêt de la seconde approche, celle dite des méthodes spectrales, réside dans la précision : ici, les dérives spatiales deviennent des multiplications dans l'espace spectral plutôt que des variations. Ces méthodes spectrales reposent sur des transformations directes et indirectes faisant passer de l'espace physique (réel) à l'espace spectral, et vice versa, ce qui est préférable pour évaluer les termes non linéaires. Pour la plupart de ces transformations, il existe des **algorithmes** utilisant les **transformées de Fourier**, ce qui les rend numériquement très efficaces et rapides (FFT pour *Fast Fourrier Transform*). En revanche, les méthodes spectrales s'avèrent moins efficaces pour traiter des chocs car il est difficile de décrire des discontinuités avec des fonctions trigonométriques (phénomène dit des anneaux de Gibbs[6]).

Afin de mettre en œuvre la contrainte concernant la conservation du flux magnétique, les chercheurs disposent de deux stratégies, à savoir la méthode dite de la « décomposition toroïdale/poloïdale du champ » et celle dite du « flux contraint ». La première de ces approches consiste à introduire directement la contrainte dans les équations, ce qui entraîne une augmentation de l'ordre du système d'équations à résoudre : dès lors, ce n'est plus le champ magnétique que l'on évalue mais les potentiels magnétiques dont il dérive. Cette stratégie convient particulièrement aux méthodes spectrales pour lesquelles les dérivées successives restent précises. En revanche, mieux vaut utiliser la méthode dite de « flux contraint » pour les grilles capturant les chocs, par exemple celle dite de Godunov ou la *Piecewise parabolic method* (PPM) : ce sont des méthodes numériques permettant un traitement spécifique des discontinuités réduisant le lissage du choc que des méthodes plus classiques opèrent. La méthode dite de « flux contraint » repose sur le fait que l'intégrale, sur le volume élément de la divergence du champ magnétique, se réduit à l'intégrale de surface du flux magnétique défini au centre de la surface. Or, en utilisant l'équation d'induction dans son approximation idéale (on néglige les effets liés à la conductivité électrique finie du plasma), on peut relier cette intégrale de surface sur le flux magnétique au calcul d'une circulation de la force électromotrice (emf)[7]. Un simple bilan des contributions des différentes forces électromotrices sur les différents segments formant le contour (par exemple les quatre côtés d'un carré) montre que les contributions s'annulent 2 à 2, laissant le flux magnétique inchangé. Dès lors, si une simulation est initialisée avec un flux magnétique nul, il le restera à la précision machine près.

Dans les simulations, le nombre de types d'ondes dépend des hypothèses considérées pour l'évolution du plasma : incompressible, anélastique ou compressible. Par exemple, dans le code ASH, les ondes d'Alfvèn et les ondes magnéto-sonores lentes sont bien prises en compte, mais pas les ondes purement compressibles. À l'inverse, avec le code RAMSES, toutes les ondes sont traitées, même les ondes compressibles ou les chocs. Elles sont traitées dans une approche de MHD idéale (la dissipation est purement numérique afin de stabiliser le schéma numérique). La **modélisation** du magnétisme cosmique appelle le développement de codes sur des machines massivement parallèles capables d'effectuer des calculs en quelques jours ou semaines, alors que des ordinateurs domestiques mettraient plusieurs décennies. On les trouve notamment au **Centre de calcul recherche et technologie** (CCRT), l'une des composantes du complexe de calcul scientifique du CEA localisé sur le site de Bruyères-le-Châtel (Centre DAM/Ile-de-France) ou au Grand équipement national de calcul intensif (Genci)[8]. Là encore, le SAp a développé deux stratégies : le parallélisme par décomposition de domaines (distribution de sous-domaines parmi les processeurs) ou le parallélisme dans l'espace spectral (distribution des nombres d'ondes). Le choix du problème astrophysique peut donc amener à des solutions numériques très variées alors même que le système d'équations physiques initial reste similaire.

corps céleste	amplitude champ magnétique B en Gauss (G)	taille caractéristique (L) ou forme (topologie) du champ
champ intergalactique	10^{-9}	
galaxie	2×10^{-6}	B régulier, L ~ plusieurs kiloparsec
nuage interstellaire	10^{-5}	10 parsec
mazer, nuage dense froid	10^{-2} à 10^{-3}	< 10^{16} cm
quasars (radio galaxie)	100	~ 1 parsec
Soleil		
champ poloïdal	1 à 10	0,1 à 1 rayon solaire (dipôle et quadripôle)
champ toroïdal	> 10^{3}	5 000- 50 000 km
champ coronal	10^{-5}	quelques rayons solaires
étoiles Ap	10^{4}	dipôle oblique, starpôle
naines blanches	10^{6} à 10^{8}	dipôle
pulsar (étoiles à neutrons)	10^{12} (magnestar 10^{15})	dipôle
binaires X-ray (avec trou noir)	10^{-9}	3 à100 rayon (R) gravitationnel
planètes		
Terre	0,5 à 1	plusieurs rayons de la Terre
Jupiter	4	plusieurs rayons de Jupiter
Saturne	0,2 à 0,4	plusieurs rayons de Saturne
Mercure	5×10^{-3}	1 à 2 rayon de Mercure
Mars	< 3×10^{-4}	reliquat dans la croute

Propriétés du magnétisme cosmique pour différents objets célestes. Nous listons l'amplitude typique du champ magnétique en Gauss (10^4 G = 1 Tesla) et leur taille caractéristiques (L). Les méthodes d'observation du champ magnétique reposent essentiellement sur trois approches : soit la polarisation de la lumière traversant le champ magnétique de l'objet observé (effet Hanle, rotation Faraday), soit la modification des niveaux d'énergie des atomes baignés dans un champ magnétique (effet Zeeman), soit par émission cyclotron ou synchrotron des électrons en mouvement giratoire le long des lignes de champ de l'objet.

(6) Il s'agit d'un bruit numérique se caractérisant par des anneaux concentriques autour des structures les plus raides.

(7) emf = $u \times B$ (u étant la vitesse du plasma, B désignant le champ magnétique et x, les produits vectoriels).

(8) Société civile détenue à 50 % par l'État représenté par le ministère de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur, 20 % par le CEA, 20 % par le CNRS et 10 % par les universités.

Les figures 1, 2, 3 et 4 montrent des simulations 3-D MHD illustrant les récents résultats obtenus par le SAp sur le magnétisme cosmique. Le calcul de l'effet dynamo et de l'activité magnétique solaire avec ASH (figure 1) a permis de mettre en évidence l'efficacité de la convection turbulente pour générer et entretenir un champ magnétique à toutes les échelles spatiales (y compris à des échelles supérieures à celles de l'écoulement, on parle de dynamo grande échelle). Il a également permis de montrer le rôle de la **tachocline** à la base de cette zone pour organiser le champ sous forme de « ruban » et de contribuer à l'établissement d'un cycle de 11 ans ainsi que l'évaluation quantitative de la rétroaction de la force de Lorentz sur l'écoulement moyen et l'émergence de flux magnétique à la surface du Soleil (figure 2). Enfin, grâce aux calculs réalisés par RAMSES, il a encore été possible de modéliser la diffusion ambipolaire et le rôle régulateur du champ magnétique dans la formation des étoiles, favorisant l'effondrement le long des lignes plutôt que perpendiculairement ainsi que la formation de jets le long de l'axe de rotation du corps central (figure 3) ou l'organisation le long des bras spiraux des galaxies du champ magnétique (figure 4).

> Allan-Sacha Brun
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles
(CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

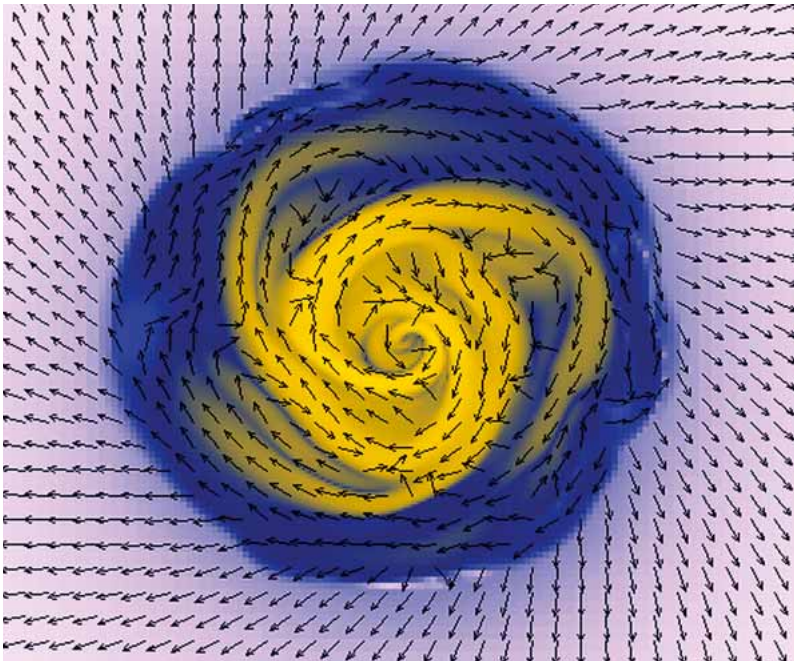


Figure 4.
Disque galactique vu de dessus montrant le logarithme de la densité (où on remarque les bras spiraux de la galaxie) et l'organisation du champ magnétique (flèches) le long des bras.

POUR EN SAVOIR PLUS

A. S. Brun, M. Miesch, J. Toomre, Global-Scale *Turbulent Convection and Magnetic Dynamo Action in the Solar Envelope*, 2004, ApJ, 614, 1073.

Des supercalculateurs pour mieux connaître l'Univers

La diffusion du parallélisme dans toute la pyramide de l'informatique et la prise en compte de contraintes multiples, comme la gestion des données ou l'architecture hiérarchisée des supercalculateurs, plongent les spécialistes du calcul scientifique au cœur d'une tourmente. En effet, l'installation, l'utilisation et l'administration de leurs nouveaux moyens de calcul s'opèrent désormais à l'instar des très grands équipements et la communauté des usagers doit donc apprendre à s'organiser en équipes pluridisciplinaires autour d'eux.

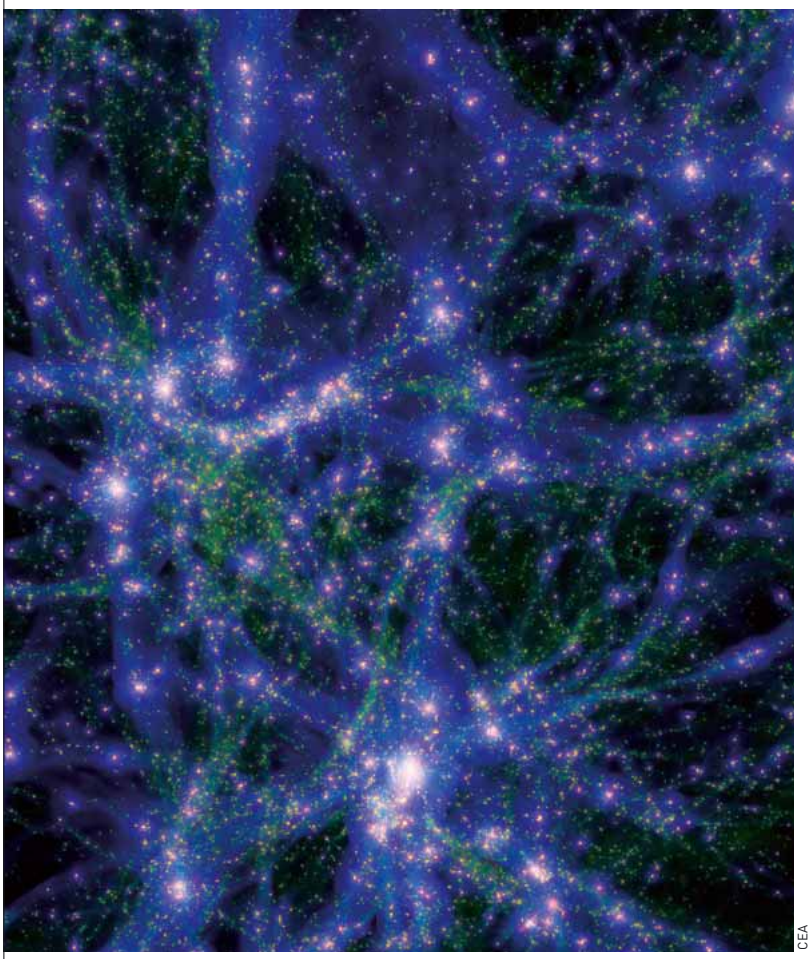
CEA

Supercalculateur BULL hybride installé au CCRT en 2009.

Ainsi, pour réussir pleinement les changements d'échelles résultant des avancées technologiques enregistrées dans le domaine du calcul de haute performance (le HPC pour *High Performance Computing*), les chercheurs en sciences fondamentales et appliquées doivent avoir accès à des ressources de calcul pouvant aller jusqu'au calculateur entier, au moins pendant des périodes limitées de temps. Il existe un moment propice pour une utilisation dite « grand challenge ». Il s'agit de la période de mise en production de la machine qui va de 3 à 6 mois après la réception du calculateur. Et pour cause, il s'agit d'un moment privilégié pendant lequel les équipes du centre de calcul (ingénieurs systèmes et spécialistes applicatifs) et les experts du constructeur informatique se retrouvent tous ensemble et mobilisés sur le site pour régler d'éventuels problèmes liés au démarrage de l'instrument. Les chercheurs peuvent alors bénéficier de cette étroite collaboration entre spécialistes pour optimiser leur logiciel de simulation et pour espérer franchir de nouvelles étapes dans la réalisation de simulations de très grande taille. Ainsi, les simulations de quelques milliers de processeurs qui relevaient, il y a peu de temps encore, du défi technique, sont-elles désormais très fréquentes.

En astrophysique, les grands challenges visent une meilleure prise en compte des couplages d'échelles inhérents à la plupart des phénomènes physiques rencontrés, cela en augmentant la **résolution spatiale** et/ou temporelle. La très grande quantité de mémoire disponible sur les supercalculateurs, associée à des techniques numériques novatrices, favorise l'accès à des résolutions spatiales de plus en plus importantes. L'objectif reste de s'approcher des échelles de dissipation dans les écoulements **turbulents**, de résoudre les cœurs protostellaires lors de la simulation d'un nuage moléculaire, ou encore de simuler finement les **galaxies** dans un contexte cosmologique. De cette dernière problématique naquit, en 2007, le code RAMSES, développé par le SAp, pour étudier la formation des grandes structures et des galaxies. Il s'agit d'un code s'inscrivant dans le cadre du projet Horizon visant à fédérer les activités de simulation numérique autour d'un projet ciblé sur l'étude de la formation des galaxies. Cette réflexion fut menée pendant la période de démarrage du calculateur Bull Platine, au Centre de calcul recherche et technologie (CCRT) du CEA, avec pour objectif la simulation de la formation d'une moitié de l'Univers observable. Pour la première fois dans l'histoire du calcul scientifique, il fut possible de décrire une galaxie comme la **Voie lactée** avec plus d'une centaine de particules tout en couvrant la moitié de l'Univers observable. Pour simuler un tel volume avec autant de détails, les acteurs du projet Horizon utilisèrent 6 144 processeurs Intel Itanium2® du calculateur Bull Platine pour activer le programme RAMSES à plein régime. Ce logiciel de simulation met en jeu une grille adaptative permettant d'atteindre une finesse spatiale inégalée. Avec près de 70 milliards de particules et plus de 140 milliards de mailles, ce grand challenge représente le record absolu pour un système à N corps modélisés par ordinateur.

Cet exemple montre bien, qu'en matière de simulation, les avancées promises par les ordinateurs de grande puissance ne s'obtiennent qu'au prix d'une maîtrise de la complexité – celle concernant à la fois les modèles physiques, les méthodes et les **algorithmes** numériques, les méthodologies et les techniques de programmation et d'optimisation parallèles. De plus, la nécessité de contenir la consommation électrique a favorisé l'apparition d'un nouveau type de supercalculateurs capables de combiner un très grand nombre de processeurs généralistes avec des processeurs spécialisés (processeurs graphiques, reconfigurables, vectoriels…). Dès l'été 2009, la communauté scientifique française a pu accéder à ces supercalculateurs hybrides grâce à la machine BULL installée au CCRT. Avec plus de 2 100 processeurs Intel de nouvelle génération, associés à 48 serveurs graphiques Nvidia, c'est le premier supercalculateur de ce type implanté en Europe.



CEA

Le code RAMSES permet l'étude des structures de l'Univers à grande échelle ainsi que la formation des galaxies. La plus grande simulation de la formation de ces structures a été réalisée dans le cadre du projet Horizon, soutenu par l'Agence nationale pour la recherche (ANR).

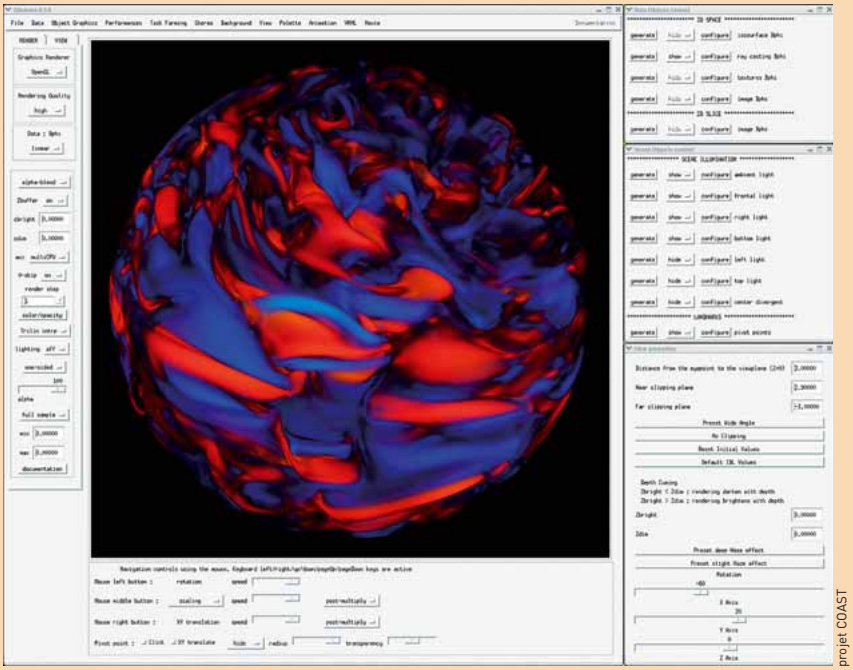
> **Pierre Leca** et **Christine Menaché**
Département des sciences de la simulation
et de l'information (DSSI)
Direction des applications militaires (DAM)
CEA Centre DAM Ile-de-France

> **Édouard Audit**
Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles
(CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

La visualisation des simulations astrophysiques

La simulation numérique des plasmas astrophysiques produit des données de taille et de complexité considérables. Pour les comprendre et les interpréter, les astrophysiciens doivent les visualiser avec des outils logiciels adaptés. À cette fin, le logiciel SDvision (*Saclay Data Vizualisation*), développé à l'Irfu, permet une visualisation interactive de simulations produites sur des ordinateurs massivement parallèles, utilisant des milliers de processeurs, produisant des données de taille pouvant dépasser le téraoctet (figure 1). La complexité des simulations réside essentiellement dans la mise en œuvre du maillage de l'espace dont la résolution varie en fonction de différents critères physiques.

La technique numérique du maillage à résolution adaptative (figure 2) concentre le temps de calcul, et la mémoire allouée, sur des zones accueillant des phénomènes signifiants comme la formation d'amas de galaxies. En revanche, dans les zones à plus faible densité, les calculs restent à des résolutions plus modestes. Pour visualiser et analyser de telles structures de données, les chercheurs ont dû recourir à des algorithmes spécifiques et relever un défi : celui de la gestion de la mémoire. Il leur a fallu, en outre, s'adapter à divers modes d'utilisation. La visualisation et l'analyse de telles structures de données représentent un véritable défi, qui a conduit au développement d'algorithmes spécifiques, notamment en termes de gestion de la mémoire. En outre, le logiciel SDvision est adapté à des modes d'utilisation divers, par exemple sur des plateformes de visualisation locales bénéficiant de l'accélération matérielle des cartes graphiques modernes ou distantes sur des nœuds graphiques proposant d'importantes ressources (multicœurs, mémoire partagée élevée dépassant 100 Gigaoctets par nœud). Véritable instrument d'exploration des simulations, ce logiciel permet de naviguer interactivement et en immersion dans les données. Elles contribuent également à découvrir ou à étudier des structures astrophysiques à échelles multiples : par exemple, la formation des grandes structures cosmologiques, des galaxies, turbulences du milieu interstellaire participant à la création des « cœurs protostellaires » où se forment les étoiles, dynamique des disques d'accrétion planétaires, magnétohydrodynamique de la zone convective solaire...

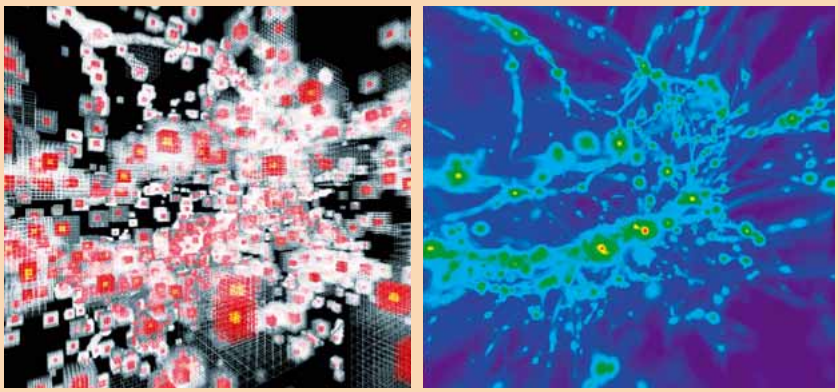


projet COAST

Figure 1.
Le logiciel de visualisation interactive SDvision utilisé, ici, pour visualiser le champ magnétique obtenu dans une simulation de la zone convective solaire.

Le logiciel est employé dans une salle de visualisation stéréoscopique installée au Service d'astrophysique (SAp/Irfu). Il s'agit d'une technique qui appréhende complètement la structuration des volumes simulés dans les trois dimensions. Ces développements, qui ont pour moteur principal la recherche fondamentale en astrophysique, devraient également bénéficier à d'autres domaines de la recherche et de la technologie utilisant la simulation numérique : par exemple, pour explorer des simulations du transport turbulent dans le plasma du futur réacteur expérimental ITER (pour *International Thermonuclear Experimental Reactor*) actuellement en construction sur le centre du CEA de Cadarache. Il s'agit d'une collaboration avec l'Institut de recherche sur la fusion magnétique (DSM).

La montée en puissance des grands centres de calculs nationaux laisse prévoir l'obtention de simulations toujours plus massives et plus complexes mais aussi de nouveaux défis à relever en matière de visualisation des simulations destinées à l'astrophysique.



Projet COAST

Figure 2
Visualisation d'une simulation cosmologique.
À gauche : le maillage à résolution adaptative employé dans la simulation, représenté à travers les mailles de résolutions les plus élevées.
À droite : la distribution de la densité de matière calculée sur ce maillage.

> **Daniel Pomarède**
et **Bruno Thooris**
Service de l'électronique, des détecteurs et de l'informatique (Sedi)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay

Godunov, une plate-forme numérique pour l'enseignement-recherche

Il devient indispensable d'enseigner les techniques et les méthodologies destinées à la modélisation et la simulation numérique aux étudiants, aux doctorants et postdoctorants, ainsi qu'aux chercheurs et ingénieurs, impliqués ou non en astrophysique, et qui souhaitent voir évoluer leurs connaissances. D'où la mise en place, depuis 2007, de la plate-forme numérique pour l'enseignement et la recherche *Godunov* (du nom du mathématicien qui développa une méthode classique de résolution des équations de l'hydrodynamique). Il s'agit d'une collaboration entre le SAp, l'Unité d'enseignement en sciences de la matière et de simulation (UESMS) de l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN) et l'Université Paris 7/ Denis-Diderot.

Située sur le centre du CEA de Saclay, cette plate-forme a été équipée de vingt postes de travail, reliés par un réseau rapide à un *cluster* de calcul, c'est-à-dire un ordinateur parallèle comportant 240 cœurs de calcul. Bien que la plate-forme soit également destinée à la recherche, les activités pédagogiques demeurent néanmoins prioritaires. Ainsi, pendant les cessions de formations, le *cluster* demeure exclusivement réservé aux étudiants afin qu'ils s'initient au calcul haute performance à l'aide d'un outil à la fois performant et disponible, avant de se confronter à des ordinateurs de plus grande taille.

Les enseignements correspondent à un niveau postdoctoral, principalement dans le cadre de l'École doctorale d'astrophysique, mais aussi à celui des masters dans lesquels le CEA s'implique *via* l'INSTN : par exemple, astronomie & astrophysique, modélisation et simulation (M2S), matériaux pour les structures et l'énergie (MSE) et interaction climat et environnement (ICE). À ces enseignements s'ajoutent deux formations continues. L'une menée conjointement par l'INSTN et le SAp où sont abordées les méthodes de Monte-Carlo et les techniques de programmation parallèle (librairie MPI) ; l'autre étant dédiée aux utilisateurs du Centre de calcul du CEA (CCRT).

Outre sa vocation pédagogique, *Godunov* sert au traitement de données pour l'astrophysique. Par exemple, la préparation des algorithmes de traitement de données émanant du satellite GLAST (pour *Gamma-ray Large Area Space Telescope*) et la réalisation du catalogue des sources. D'autres expériences, comme le *weak lensing*[1], bénéficient également de cette plate-forme pour leurs besoins de calcul, importants mais ponctuels, en matière de traitement des images.

(1) Technique qui permet de cartographier la distribution de la matière noire dans l'Univers et de caractériser les propriétés de l'énergie noire.

> Édouard Audit
Service d'astrophysique (Sap)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles
(CEA-Université de Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

> Constantin Meis
Institut national des sciences et techniques du nucléaire (INSTN)
Unité d'enseignement en sciences de la matière et de simulation (UESMS)
CEA Centre de Saclay

CEA/L. Godart

Enseignement dans la salle de calcul de la plate-forme Godunov : simulation de plasma.

Institutions et **organismes :** qui fait quoi ?

Boeing (The Boeing Company) : un des plus grands constructeurs pour l'aéronautique et l'aérospatiale du monde, dont le siège se trouve à Chicago (États-Unis).

Bull : société française spécialisée dans l'informatique professionnelle dont les calculateurs à haute performance (HPC).

CASC (China Aerospace Science and Technology Corporation/Agence spatiale chinoise) : fondée en 1968, elle gère l'Administration spatiale nationale de Chine (CNSA), la Commission des sciences, technologies et industries pour la Défense nationale (COSTIND), le Centre pour les sciences spatiales et la recherche appliquée de l'Académie des sciences chinoise (CSSAR).

CCRT (Centre de calcul recherche et technologie) : composante du complexe de calcul scientifique du CEA localisé sur le site de Bruyères-le-Châtel (Centre DAM-Ile de France) ouvert pour répondre aux besoins du CEA et de ses partenaires en matière de grandes simulations numériques et pour favoriser les échanges et les collaborations scientifiques, dans un contexte où l'accès à la simulation numérique haute performance est devenu un des enjeux stratégiques de la compétitivité des entreprises et des organismes de recherche.

CDS (Centre de données astronomiques de Strasbourg) : procède à la collection et à la distribution de données astronomiques, héberge la base de référence mondiale pour l'identification d'objets astronomiques.

Cern : organisation européenne pour la recherche nucléaire dont l'acronyme vient du nom provisoire de l'organisme (Conseil européen pour la recherche nucléaire) ; situé à la frontière franco-suisse, il est le plus grand centre de physique des particules du monde.

CESR (Centre d'étude spatiale des rayonnements) : laboratoire d'astrophysique spatiale situé à Toulouse, il est une Unité mixte de recherche du **CNRS** et de l'Université Toulouse III spécialisée dans quatre grands domaines : les plasmas spatiaux, la planétologie, l'Univers à haute énergie (X et gamma), l'Univers froid (infrarouge et submillimétrique).

Cnes (Centre national d'études spatiales) : établissement public à caractère industriel et commercial (Epic) ayant pour mission de proposer au gouvernement la politique spatiale de la France au sein de l'Europe et de la mettre en œuvre. À ce titre, il « invente » les systèmes spatiaux du futur, maîtrise l'ensemble des techniques spatiales et garantit à la France l'accès autonome à l'espace.

CNRS (Centre national de la recherche scientifique) : établissement public à caractère scientifique et technologique exerçant son activité dans tous les domaines de la recherche. L'**Institut national des sciences de l'Univers** (**Insu**) a pour mission d'élaborer, de développer et de coordonner les recherches d'ampleur nationale et internationale en astronomie, en sciences de la Terre, de l'océan et de l'espace, qui sont menées au sein du CNRS et des établissements publics relevant de l'Éducation nationale.

ESA (European Spatial Agency/Agence spatiale européenne) : organisme chargé de développer les capacités spatiales européennes et de coordonner les ressources financières de ses membres, pour entreprendre des programmes et des activités dépassant ce que pourrait réaliser chacun de ces pays à titre individuel dans la connaissance de la Terre, du système solaire et de l'Univers, ainsi que pour mettre au point des technologies et services satellitaires et pour promouvoir les industries européennes.

ESO (European Southern Observatory/Observatoire européen austral) : fondé, en 1962, pour la création d'un observatoire astronomique dans l'hémisphère austral, il est devenu l'acteur principal de l'astronomie observationnelle européenne avec un parc d'une vingtaine d'instruments (permettant des observations en imagerie, photométrie, spectroscopie, interférométrie, dans à peu près toutes les longueurs d'onde allant du proche ultraviolet à l'infrarouge thermique), et de trois sites d'observations au Chili.

IAAt (Institut für Astronomie und Astrophysik-Tübingen) : voir **Max-Planck-Institut**.

IAC (Institut d'astrophysique des Canaries) : fondé en 1975 à l'Université de la Laguna de Ténériffe.

IAS (Institut d'astrophysique spatiale) : Unité mixte de recherche du **CNRS** et de l'Université Paris-Sud 11/Orsay centrée sur l'étude du Soleil, les planètes du système solaire et les planètes extrasolaires, la matière extraterrestre et la matière interstellaire, les galaxies et la cosmologie, l'instrumentation spatiale, l'astrochimie expérimentale portant sur la matière solide extraterrestre et interstellaire, la détection de la matière noire à l'aide de bolomètres massifs.

IN2P3 (Institut national de physique nucléaire et de physique des particules) : institut du **CNRS** qui a pour mission de promouvoir et fédérer les activités de recherche dans les domaines de la physique nucléaire et des hautes énergies ; il coordonne les programmes dans ces domaines pour le compte du CNRS et des universités, en partenariat avec le CEA ; ces recherches ont pour but d'explorer la physique des particules élémentaires, leurs interactions fondamentales ainsi que leurs assemblages en noyaux atomiques, et d'étudier les propriétés de ces noyaux.

JAXA (Agence japonaise d'exploration spatiale) : regroupe, depuis 2003, l'Institut de sciences spatiales et d'astronautique (ISAS) dédié à la recherche spatiale et planétaire, le Laboratoire national d'aérospatiale (NAL) conduisant des activités de recherche et développement sur les aéronefs de prochaine génération et l'Agence nationale japonaise pour le développement spatial (NASDA) responsable du développement de véhicules de lancement à grande capacité, comme le lanceur H-IIA, de plusieurs satellites et d'éléments de la station spatiale internationale.

Jet Propulsion Laboratory : laboratoire commun entre la **NASA** et le Caltech chargé de la construction et de la supervision des vols non habités de la NASA.

Laboratoire APC (Astroparticule cosmologie) : regroupant le **CNRS**, le CEA, l'Université Paris VII, l'**Observatoire de Paris** et l'Institut KAVLI de Stanford, il a permis la création d'un axe transatlantique pour renforcer les collaborations et la coordination des projets dans le domaine de l'astroparticule (énergie et matière noire, rayons gamma de haute énergie et sursauts gamma, ondes gravitationnelles, physique théorique, traitement des données et simulations numériques).

Laboratoire de photonique et de nanostructures : laboratoire du **CNRS** ayant pour vocation l'avancement coordonné de la recherche fondamentale et de la recherche appliquée en s'appuyant sur l'exploitation et le développement de ses compétences technologiques.

LAM (Laboratoire d'astrophysique de Marseille) : Unité mixte de recherche du **CNRS** et de l'Université d'Aix-Marseille 1 qui associe la recherche fondamentale en astrophysique et la recherche technologique en instrumentation avec d'importants programmes dans les domaines de la cosmologie, de la physique et de l'évolution des galaxies, du milieu interstellaire, de la formation des systèmes stellaires et planétaires, du système solaire, et de l'optique astronomique.

Lesia (Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique) : un des cinq départements scientifiques de l'**Observatoire de Paris-Meudon** en même temps qu'un laboratoire du **CNRS** associé aux Universités Paris VI et Paris VII.

MPA (Max-Planck-Institut für Astrophysik) : l'un des 80 instituts de recherche du **MPG**. Fondé en 1958, le **Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik** a, en 1991, éclaté en plusieurs instituts : le MPA, le **MPE** et le Max-Planck-Institut für Physik. Situé à Garching (à côté du quartier général de l'**ESO**), le MPA aborde de nombreux thèmes d'astrophysique théorique, de l'évolution stellaire à la cosmologie. Il occupe 120 personnes, dont 46 chercheurs permanents. Depuis 1996, il fait partie de l'Association européenne pour la recherche en astronomie (EARA) qui regroupe entre autres l'**IAC** et l'Institut d'astrophysique de Paris (IAP).

MPE (Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik) : l'un des 80 instituts de recherche du **MPG**. Créé en 1963 et appartenant alors au **Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik**, il est devenu un institut indépendant en 1991. Localisé à Garching, il compte parmi ses principaux thèmes de recherche les observations astronomiques dans des régions spectrales seulement accessibles depuis l'espace (infrarouge lointain, rayons X et gamma) et la physique des plasmas cosmiques.

MPG (Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e. V.) : la société Max-Planck pour le développement de la science est un organisme public indépendant allemand à but non lucratif, qui promeut et soutient la recherche de ses propres instituts. Fondée le 26 février 1948, elle agit en complément de l'université (avec des moyens plus importants et une réelle interdisciplinarité) ou en collaboration. Elle assume donc un rôle équivalent à celui du **CNRS** en France, soutenant une recherche fondamentale de niveau mondial. Elle compte aujourd'hui 80 instituts et emploie 13 000 personnes.

MPIfR (Max-Planck-Institut für Radioastronomie) : l'un des 80 instituts de recherche du **MPG**. Créé en 1966 à partir de l'Institut de radioastronomie de l'Université de Bonn, datant des années 1950, il se consacre à la recherche d'objets astronomiques dans les domaines radio et infrarouge. Il exploite à Effelsberg un radiotélescope de 100 mètres de diamètre, inauguré en 1972. Il gère, avec l'**ESO** et l'**OSO**, le radiotélescope APEX situé au Chili.

NASA (National Aeronautics and Space Administration) : créée le 29 juillet 1958 à partir du NACA (agence de recherche aéronautique), l'agence spatiale américaine gère la plupart des activités spatiales civiles des États-Unis ainsi que les collaborations avec les agences étrangères. Elle comprend 18 centres de recherche dont l'Ames Research Center de Mountain View ou le **Jet Propulsion Laboratory** de Pasadena.

NVIDIA Corporation : société américaine *fabless* (conceptrice mais non fabricante) qui est l'un des plus grands fournisseurs de processeurs et de cartes graphiques, de chipsets, consoles de jeux...

Observatoire de Bologne : instrument de recherche de l'Institut national d'astrophysique (Inaf) placé sous la tutelle du ministère de la Recherche italien ; ses chercheurs travaillent dans différents champs de l'astrophysique comme les étoiles, la structure et l'évolution des galaxies, la simulation... en collaboration avec de nombreux organismes locaux et internationaux.

Observatoire de Leiden (Pays-Bas) : construit, en 1633, par l'Université de Leyde, pour abriter le quadrant de Snellius, il est l'un des plus anciens observatoires encore en activité. Son département astronomique, le plus important des Pays-Bas, est reconnu dans le monde entier pour ses recherches sur divers champs de l'astronomie.

Observatoire de Paris : fondé en 1667, il est devenu un Grand établissement relevant du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Il a le statut d'université et compte 7 laboratoires qui sont des Unités mixtes de recherche avec le **CNRS** et avec de grandes universités scientifiques de la région parisienne. Ce pôle national de recherche en astronomie est implanté sur trois sites : **Paris**, **Meudon** et **Nançay** (radiotélescope).

Observatoire royal d'Édimbourg : abrite un centre de recherche en astronomie ayant participé à la construction de plusieurs instruments pour des observatoires au sol ou des satellites. S'y trouve la bibliothèque Crawford, une des plus complètes bibliothèques astronomiques du monde.

Onera (Office national d'étude et de recherche spatiale) : premier acteur français de la R&T aéronautique, spatiale et de défense ayant pour missions d'orienter et conduire les recherches dans le domaine aérospatial, de valoriser ces recherches pour l'industrie nationale et européenne, de réaliser et mettre en œuvre les moyens d'expérimentation associés, de fournir à l'industrie des prestations et des expertises de haut niveau, de conduire des actions d'expertise au bénéfice de l'État et de former des chercheurs et des ingénieurs.

OSO (Onsala Space Observatory) : observatoire de radioastronomie fondé en Suède en 1949, dépendant de l'École polytechnique Chalmers, qui est une fondation privée, et financé en partie par le conseil de la Recherche suédois (équivalent du ministère français). Cette installation exploite deux radiotélescopes (20 et 25 mètres) et participe à de nombreux projets internationaux, en particulier APEX, ALMA, Herschel.

OSUG (Observatoire des sciences de l'Univers de Grenoble) : fédération de 6 laboratoires (dont le **Laboratoire d'astrophysique**) et 3 équipes de recherche, appartenant à l'Université Joseph Fourier, en partenariat avec le **CNRS/Insu**. Il se consacre à trois grands thèmes : l'Univers, la dynamique de la Terre et les grands cycles naturels.

Projet Horizon : né du rapprochement de 5 équipes de différents instituts, le projet fédératif Horizon veut utiliser une architecture massivement parallèle pour étudier la formation des galaxies dans un cadre cosmologique à partir de simulations numériques. Il s'agit d'exploiter les ressources informatiques centralisées existant en France (le **CCRT** du CEA, l'Institut du développement et des ressources en informatique scientifique IDRIS du **CNRS**, le Centre informatique national de l'enseignement supérieur CINES) dans le cadre des Programmes nationaux de cosmologie et des galaxies.

Sagem : société de haute technologie, leader mondial de solutions et de services en optronique, avionique, électronique et logiciels critiques, pour les marchés civils et de défense.

Thalès (anciennement Thomson-CSF) : société d'électronique spécialisée dans l'aérospatiale, la Défense, les technologies de l'information, actuellement leader mondial des systèmes d'information critiques sur les marchés de l'aéronautique et de l'espace, de la Défense et de la Sécurité.

Unesco (Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture) : fondée en 1945 pour construire la paix dans l'esprit des hommes à travers l'éducation, la science, la culture et la communication.

Glossaire

A

absorption : processus par lequel l'intensité d'un rayonnement décroît quand il traverse un milieu matériel auquel il transfère tout ou partie de son énergie.

accrétion : capture de matière par un objet céleste sous l'effet de la **force de gravitation**.

adiabatique : se dit d'un système qui n'échange pas de chaleur avec l'extérieur.

adsorption : fixation de **molécules** sur une surface solide par un processus généralement passif et non spécifique (par exemple, par effet électrostatique en milieux gazeux ou liquide). La **désorption** est le phénomène inverse.

algorithme : méthode théorique de calcul numérique qui est mise en œuvre sur un ordinateur par le biais d'un langage de programmation.

amas de galaxies : ils sont formés de centaines de **galaxies**. Elles ne constituent cependant que 5 % de la masse totale de l'amas tandis que la **matière noire** en constitue 70 à 80 %. Le reste est un gaz chaud dont la température atteint 10 à 100 millions de degrés. Ce **plasma** est un fort émetteur de **rayons X**. Ces trois composantes sont liées entre elles par l'**attraction gravitationnelle**.

amas stellaire : groupe d'**étoiles** nées d'un même nuage **moléculaire** et qui sont encore liées par la **gravitation**. Ces étoiles ont donc le même âge et la même composition chimique. Il convient de distinguer les **amas ouverts**, groupes de quelques dizaines à quelques milliers d'étoiles se formant dans les nuages moléculaires du plan galactique, et les **amas globulaires** de structure sphérique, composés de quelques dizaines de milliers à quelques millions d'étoiles.

angström (Å) : 1 Å = 10^{-10} mètre.

anisotropie : voir **isotropie**.

année-lumière : distance parcourue en un an par la lumière (à la vitesse de 299 792,458 km/s dans le vide), soit 9 460,53 milliards de kilomètres ou 63 239 **unités astronomiques**.

antimatière : se compose d'antiparticules de la même manière que la matière est composée de particules ; à chaque particule est associée une antiparticule, de charge électrique opposée, qui a la propriété de pouvoir s'annihiler avec elle : par exemple, un **électron** et un positon (nom de l'antiélectron) peuvent s'annihiler en deux **photons**.

arcs lumineux : l'image d'une source ponctuelle déformée par une **lentille gravitationnelle** présente souvent des arcs lumineux résultant de la déviation de sa lumière par la masse de la lentille.

astéroïdes : petits corps célestes faits de roches ou de métal qui gravitent autour du **Soleil**, dont la taille est comprise entre un millier de kilomètres et une fraction de kilomètre. Il en existerait au moins un million ayant plus d'un kilomètre de diamètre. La plupart tournent autour du Soleil entre Mars et Jupiter.

astrométrie : branche de l'astronomie qui s'intéresse à la position et aux mouvements des corps célestes.

asymétrie baryonique : différence (non nulle) entre la densité de **baryons** et la densité d'antibaryons.

asymétrie leptonique : différence (non nulle) entre la densité de **leptons** et la densité d'antileptons.

atome : constituant de base de la matière ordinaire, composé d'un **noyau** (constitué de **neutrons** et de **protons**) autour duquel gravitent des **électrons**.

attraction gravitationnelle : propriété de tous les objets physiques de l'Univers de s'attirer les uns les autres. La **force gravitationnelle** est universelle et sa portée infinie.

aurores boréales (et australes) : phénomène lumineux coloré créé dans l'*ionosphère* (région de particules chargées dans la haute atmosphère s'étendant pour la Terre de 40 km à 460 km ou plus) d'une **planète** comme la Terre. Il est causé par l'interaction (collisions) entre des particules **ionisées** du **vent solaire** piégées par le **champ magnétique** de la planète et des **atomes** de la haute atmosphère à proximité des pôles magnétiques (aurores boréales dans l'hémisphère Nord ; aurores australes dans l'hémisphère Sud).

B

barrière coulombienne : répulsion électrique qui s'oppose au rapprochement de deux particules chargées (**protons** de deux **noyaux**, notamment), dont les charges sont de même signe. Cet obstacle peut être surmonté si les vitesses relatives des deux particules sont suffisamment grandes. Par le biais de l'**interaction nucléaire**, qui s'exerce à très courte distance, elles peuvent alors subir une réaction de **fusion thermonucléaire**.

baryogenèse : ensemble de processus physiques conduisant à la formation d'une **asymétrie** entre densité de **baryons** et densité d'antibaryons ; **baryogenèse électrofaible :** mécanisme de baryogenèse ayant pour particularité de se produire lors de la transition de phase électrofaible (période de l'histoire de l'Univers au cours de laquelle les particules acquièrent leurs masses).

baryon : particule non élémentaire (état lié de 3 quarks) dont les exemples les plus connus sont le **proton** et le **neutron**, constituants du **noyau** ; l'antibaryon est l'antiparticule d'un baryon comme l'antiparticule du proton est appelée antiproton, celle du neutron antineutron.

big bang : Modèle standard de la **cosmologie** selon lequel l'Univers observable est en expansion depuis environ 14 milliards d'années.

bolomètre : dispositif permettant de mesurer un flux d'énergie incident (porté par des **photons** ou des particules massives) par l'élévation de température consécutive au dépôt d'énergie.

boson de Higgs : particule prévue dans le **Modèle standard** pour expliquer la masse de toutes les autres particules ; elle demeure la dernière particule restant encore à découvrir pour compléter le modèle ; le LHC a été notamment construit pour la produire.

bosons Z et W : comme le **photon** est la particule médiatrice de la **force électrique**, les bosons Z et W sont les médiateurs des **forces faibles**, celles responsables de la **radioactivité** bêta ; au contraire du photon, ils sont très lourds (environ 100 **gigaélectronvolts**, soit 100 fois un **proton**), ce qui explique pourquoi la force faible est beaucoup moins intense que la force électrique.

brane : hypothétiques objets qui peupleraient les dimensions supplémentaires de l'**espace-temps** à plus de 4 dimensions ; dans certains modèles, ces objets plans joueraient le rôle de bord des dimensions supplémentaires.

C

ceinture d'astéroïdes : entre Mars et Jupiter, à 478,72 millions de kilomètres de distance du **Soleil**, gravitent des petits corps de forme irrégulière appelés **astéroïdes**. Il y aurait entre 1 et 2 millions d'astéroïdes de plus de 1 km de diamètre. Large de 200 millions de kilomètres, cette ceinture d'astéroïdes serait une **planète** n'ayant pas pu se former à cause de la **gravitation** de Jupiter.

ceinture de Kuiper : vaste région du système solaire, peuplée d'**astéroïdes** et de noyaux de **comètes**, qui s'étendrait dans le plan de l'**écliptique** (plan de l'orbite terrestre autour du **Soleil**), au-delà de l'orbite de Neptune et jusqu'à 500 **unités astronomiques** du Soleil.

céphéide : **étoile** variable **brillante** de la constellation de Céphée. Sa **luminosité**, sa période d'évolution et sa couleur sont corrélées.

Les céphéides constituent donc de bons indicateurs de distance, notamment pour les **galaxies** proches.

champ magnétique : champ de force généré par des courants électriques. Il s'exprime en **tesla** ou en **gauss** (1 G = 10^{-4} T). La **composante toroïdale** du champ est orientée comme les parallèles du globe. La **composante poloïdale** du champ reliant les pôles est donc orientée comme les méridiens.

champ scalaire : particules et champs sont les deux facettes de la version **relativiste** de la dualité onde-corpuscule de la mécanique **quantique** ; les particules sont classifiées par leur spin (1/2 pour l'**électron** et 1 pour le **photon**) ; les champs scalaires sont les **ondes** associées aux particules de spin 0.

charbon actif : charbon d'origine végétale ayant subi un processus d'activation lui conférant une surface spécifique importante et donc un fort pouvoir **adsorbant**.

choc : discontinuité de densité comme celle produite par un avion passant le mur du son.

chromosphère : couche basse de l'atmosphère solaire située au voisinage immédiat de la **photosphère**.

combustible (thermonucléaire) : **éléments légers** pouvant **fusionner** dans un réacteur **thermonucléaire** (ou une **étoile**) et produire de l'énergie.

comète : corps céleste du système solaire composé d'un noyau rocheux et glacé qui, au voisinage du **Soleil**, s'échauffe et éjecte une atmosphère constituée de gaz et de poussières. La chevelure ou queue ainsi formée peut s'étendre sur des millions de kilomètres.

constante de Boltzmann (k_B) : constante fondamentale intervenant pour exprimer la correspondance entre température et énergie en physique statistique ; $k_B = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ **J/K**.

constante cosmologique : constante ajoutée par Albert Einstein à sa **théorie de la relativité générale** pour aboutir à un Univers stationnaire ; lors de la découverte de l'expansion de l'Univers par Edwin Hubble, en 1929, Albert Einstein abandonna ce concept mais la découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers à la fin des années 1990 a relancé l'idée de la constante cosmologique car son introduction dans la théorie de la relativité générale permet également de décrire un Univers en expansion accélérée.

convective (région ou zone) : zone externe, où les **atomes** ne sont pas forcément **ionisés**, siège de courants **convectifs**.

coordonnées équatoriales (système de) : les **étoiles** sont repérées sur la sphère céleste par l'**ascension droite** et la **déclinaison**. L'ascension droite (α) est l'équivalent sur la sphère céleste de la longitude terrestre. Elle se mesure sous la forme d'un angle exprimé en heures (h), minutes (min) et secondes (s). La déclinaison (δ) est l'équivalent sur la sphère céleste de la latitude terrestre. Elle est exprimée en degrés (°), minutes (') et secondes ('') d'arc. La position des étoiles est souvent donnée par les catalogues en coordonnées **J2000**.

corps noir : corps idéalisé qui **absorbe** totalement les rayonnements à toutes les longueurs d'onde et émet lui-même un rayonnement qui n'est fonction que de sa température.

cosmologie : discipline qui étudie la structure et l'évolution de l'Univers dans son ensemble.

courant de fuite : courant circulant dans le détecteur, sous l'effet d'un champ électrique extérieur appliqué, ceci en l'absence d'éclairement par une source lumineuse, **X** ou **gamma** en l'occurrence.

couronne (solaire ou stellaire) : partie externe de l'atmosphère du **Soleil** (ou de l'**étoile**), transparente, qui s'étend sur des millions de kilomètres.

cryoréfrigérateur : appareil fonctionnant en circuit fermé et produisant du froid à très basse température (à température cryogénique < 120 **K** [< - 150 °C]).

cycle CNO : aussi appelé **cycle du carbone azote (oxygène)**, du nom des **éléments** qui apparaissent et interviennent dans les réactions en servant de catalyseur, ou **cycle de Bethe**, du nom du physicien américain Hans Bethe, prix Nobel 1967. Cycle de réactions thermonucléaires se produisant à l'intérieur des **étoiles** au cours duquel quatre **noyaux** d'**hydrogène** se transforment en un noyau d'**hélium** avec libération d'énergie. Ce cycle ne représenterait que 1,5 % de l'énergie solaire.

cycle solaire : variation périodique de l'**activité solaire**. Le cycle le plus net a une durée approximative de 11 ans. Cette activité se traduit par le développement de **taches solaires**.

D

deutérium : **isotope** « lourd » de l'**hydrogène** dont le **noyau** est formé d'un **proton** et d'un **neutron**. Le deutérium cosmique aurait été fabriqué lors de la **nucléosynthèse primordiale**, de sorte que, le deutérium ne pouvant être créé durablement dans les **étoiles**, la quantité actuellement présente est une indication essentielle sur la densité de la matière dans l'Univers.

diagramme de Hertzsprung-Russell : diagramme ayant pour abscisse un indicateur de la **température effective** des **étoiles** (indice de couleur B-V, **type spectral**...) et pour ordonnée un indicateur de leur **luminosité** totale. Les étoiles se regroupent dans des zones bien définies (**séquence principale**, **géantes**, **supergéantes** et **naines blanches**) qui correspondent à des stades d'évolution distincts d'étoiles de masse et de composition chimique différentes.

disque à symétrie cylindrique : un objet est à symétrie cylindrique s'il reste identique à lui-même lorsqu'on le fait tourner suivant un axe : l'axe de symétrie.

disque d'accrétion : zone de capture par un astre, sous l'effet de la **gravitation**, de matière (poussières et gaz) dont l'accumulation conduit à l'apparition d'objets plus massifs, telles les **planètes** autour d'une **étoile**.

disque protostellaire : disque de gaz issu de l'effondrement d'un nuage diffus au centre duquel une **étoile** est en cours de formation ; les parties externes du disque protostellaire peuvent donner naissance à des **planètes**.

E

échelle des magnitudes : les distances lointaines sont mesurées grâce à la **luminosité** des objets observés ; les astronomes utilisent la **magnitude** qui grade de façon logarithmique l'échelle des luminosités.

effet Compton : processus par lequel un **électron** gagne de l'énergie lors d'une collision avec un **photon** de grande énergie ; **effet Compton inverse :** transfert d'énergie par collision d'un **électron** de très haute énergie à un **photon**.

effet de lentille gravitationnelle : l'infime déviation de la lumière provenant des **galaxies** lointaines renseigne sur la distribution et la quantité de matière traversée en chemin (galaxies, **amas de galaxies**, **matière noire**), qu'elle soit visible ou invisible. L'effet est analogue à celui d'une lentille déformant légèrement le paysage d'arrière-plan.

effet dynamo : propriété que possède un fluide conducteur de générer un **champ magnétique** par ses mouvements et d'entretenir ce champ contre la **dissipation ohmique** (dégagement de chaleur lié à la résistance du conducteur au passage du courant électrique).

effet granulaire du Soleil : la surface du **Soleil** portée à près de 5 800 degrés est très **turbulente** et présente un aspect granulaire correspondant à des cellules **convectives** d'environ la taille de la France.

effet Sunyaev-Zel'dovich (SZ) : diffusion des **photons** du **fond diffus cosmologique** sur les **électrons** chauds du gaz des **amas de galaxies**. Les photons gagnent de l'énergie.

effets de marée : la **force de marée** résulte de l'inhomogénéité du champ **gravitationnel** d'un astre. Elle déforme les corps au voisinage. Dans certains cas, les forces engendrées peuvent provoquer la dislocation des petits corps.

efficacité quantique : efficacité de détection déterminée par le rapport entre le nombre de **photons** détectés sur le nombre de photons incidents. Un détecteur parfaitement efficace a une efficacité quantique de 100 %.

électromagnétique (rayonnement ou onde) : rayonnement (ou onde) qui se propage dans le vide à la vitesse de la lumière par l'interaction de **champs** électrique et **magnétique** oscillants et qui transporte de l'énergie (**photons**).

électron : particule élémentaire (lepton) chargée négativement. L'un des constituants de l'**atome**, gravitant autour du **noyau**.

électron libre : **électron**, normalement lié à distance au **noyau** d'un **atome**, qui a rompu sa liaison avec cet atome.

électronvolt (eV) : unité d'énergie correspondant à l'énergie acquise par un **électron** accéléré par un potentiel de 1 volt, soit 1 eV = $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ **joule**. Principaux multiples : le **keV** (10^3 eV), le **MeV** (10^6 eV) et le **GeV** (10^9 eV).

élément (chimique) : ensemble des **atomes** de même numéro atomique (atomes dont les **noyaux** comportent exactement le même nombre de **protons**, quel que soit le nombre de **neutrons**). On parle d'**éléments légers** (**hydrogène**, **hélium**, **lithium**, béryllium, bore) et d'**éléments lourds** (les autres, du carbone à l'uranium pour ce qui est des éléments naturels, mais plus spécifiquement ceux dont le numéro atomique est égal ou supérieur à 80).

émissivité : rapport entre le rayonnement émis par une surface et celui émis par un **corps noir** à la même température.

énergie noire : énergie de nature inconnue introduite pour expliquer l'accélération qui paraît caractériser l'expansion universelle depuis quelques milliards d'années. Son existence est fondée notamment sur l'observation de certaines explosions d'**étoiles**, les **supernovae de type Ia**.

entropie : quantité physique qui mesure le degré de désordre d'un système.

équation aux moments : équation obtenue en moyennant sur les angles l'équation du transfert **radiatif**.

équation d'état barotropique : l'équation d'état relie, entre elles, les grandeurs **thermodynamiques** d'un matériau (densité, température, pression...) ; elle permet, entre autres, de calculer la pression en fonction de la densité et de la température ; une équation d'état est dite barotropique si la pression ne dépend que de la densité.

équation de Poisson : équation décrivant les propriétés du champ **gravitationnel** et les **forces gravitationnelles** à partir d'une distribution de masse dans l'espace.

équation Vlassov-Poisson : combinaison des équations de l'hydrodynamique de l'évolution d'un fluide et de l'**équation de Poisson** décrivant la **gravitation** ; l'équation de Vlassov-Poisson décrit l'évolution d'un fluide soumis à sa propre **gravité**.

équilibre hydrostatique : équilibre qui s'instaure dans un fluide lorsque la force de **gravité** (le poids) compense exactement le gradient vertical de pression.

espace-temps : notion issue de la **théorie de la relativité restreinte** d'Einstein qui la proposa pour remplacer les notions d'espace et de temps. Le rapport entre les mesures d'espace et celles de temps est donné par une constante dont la valeur ne dépend pas de l'observateur : la vitesse de la lumière dans le vide.

étoile : sphère de gaz constituée pour l'essentiel d'**hydrogène** et d'**hélium** en équilibre sous l'action de son propre poids et de la pression de son gaz. Des réactions de **fusion thermonucléaire** se déroulent dans ses régions centrales. Les **étoiles massives** (de 10 à 100 fois la **masse solaire**) sont très chaudes (10 000 - 30 000 **K** en surface). Elles **brillent** essentiellement dans l'**ultraviolet** et sont de couleur bleue pour nos yeux. Les **petites étoiles** brillent peu, sont rouges, et mènent une vie tranquille. Leur température est faible (1 300 K en surface).

étoile à neutrons : astre essentiellement composé de **neutrons** et qui résulte de l'effondrement ultime d'**étoiles** bien plus massives que le **Soleil**. Leur rayon atteint 10 à 15 km et leur densité 10^{14} g/cm^3. Les **pulsars** (ou **étoiles pulsantes**) sont des étoiles à neutrons magnétiques en rotation rapide.

F

fission : éclatement d'un **noyau lourd** en deux morceaux, accompagné d'émission de **neutrons**, de rayonnements et d'un important dégagement de chaleur.

fond diffus cosmologique : rayonnement fossile dans le domaine des **micro-ondes**, baignant tout l'Univers, émis au moment où celui-ci est devenu transparent aux **photons**.

force de Lorentz (ou force électromagnétique) : une des quatre forces fondamentales de la physique avec la force de gravitation, les interactions faible et forte ; elle induit l'ensemble des **interactions électriques et magnétiques** observées.

force de Van der Waals : force d'**interaction électrique** de faible intensité entre **atomes** ou **molécules**.

fusion (thermonucléaire) : réaction nucléaire par laquelle de petits **noyaux atomiques** se combinent à haute température pour former de plus gros noyaux possédant une masse plus faible que la somme des masses des premiers, la différence de masse étant convertie en énergie selon la loi d'équivalence masse-énergie d'Einstein $E = mc^2$. Ce type de réactions permet au **Soleil** de **briller** durablement et est directement ou indirectement la source de la presque totalité de l'énergie sur Terre.

G

galaxie : agrégat de milliards, voire de centaines de milliards d'**étoiles** liées par l'**attraction gravitationnelle**, de poussière et de gaz **atomique** et **moléculaire** en quantités variables, formant le **milieu interstellaire**, et de **matière sombre** (ou **noire**) dont la nature reste inconnue. Leurs formes sont diverses. Les **galaxies spirales** sont constituées d'un **disque** fin rempli d'un mélange de gaz, de poussière et d'étoiles, et d'un **bulbe** plus épais au centre principalement rempli d'étoiles. C'est dans le disque qu'apparaissent des bras spiraux plus ou moins nombreux et plus ou moins marqués. Les **galaxies elliptiques**, pauvres en gaz, ont la forme d'une ellipse assez régulière. Les **galaxies irrégulières**, souvent petites et peu massives, sont riches en gaz et pauvres en étoiles. La convention est de mettre un g majuscule pour désigner notre Galaxie, la **Voie lactée** (la Galaxie, Galactique...).

gauss : une unité de mesure du **champ magnétique**, notée G et langage de programmation pour les statistiques ; du nom de Carl-Friedrich Gauss (1777-1855), mathématicien, astronome et physicien allemand.

géante rouge : **étoile brillante** mais à basse température de surface (inférieure à 5 000 **K**), de grande dimension, parvenue à l'un des derniers stades de son évolution après transformation de son **hydrogène** et de son **hélium** en **éléments lourds**.

géantes (étoiles) : **étoiles** en fin de vie ayant épuisé leur **hydrogène** dans le cœur et brûlant de l'hydrogène dans une couche entourant celui-ci. D'autres **éléments** plus **lourds** que l'hydrogène peuvent également être en train de **fusionner** dans le cœur ou en couches. Le rayon de ces géantes est de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de fois le **rayon solaire**.

gravité : phénomène par lequel un corps massif attire d'autres corps. Il relève de la **gravitation** qui fait que deux corps s'attirent mutuellement en fonction de leur masse et de l'inverse du carré de leur distance.

grille cartésienne et de résolution uniforme : découpage de l'espace en cellules carrées ou cubiques ayant toutes la même dimension.

H

halo : une vaste région plus ou moins sphérique entourant les **galaxies**, et qui comprend de la **matière noire**, de vieilles **étoiles**, du gaz mais pas de poussière.

héliosismologie : discipline qui étudie l'intérieur du **Soleil** par l'analyse de ses modes naturels d'oscillation. L'étude des vibrations du Soleil, qui se propagent depuis sa surface et vont se réfléchir sur les différentes couches intérieures, permet de mesurer des paramètres comme la vitesse du son ou la vitesse de rotation. L'**astérosismologie** étudie les mouvements sismiques des **étoiles** autres que le Soleil.

hélium : l'**élément** chimique (He) le plus léger après l'**hydrogène**. Son **noyau** est composé de deux **protons** et de deux **neutrons** pour l'**hélium 4**, l'**isotope** le plus répandu (celui de l'**hélium 3** n'a qu'un seul neutron). L'hélium présent dans l'Univers a été synthétisé lors de la **nucléosynthèse primordiale**. Rare dans l'atmosphère terrestre, il est abondant dans les **étoiles** où il est le résultat de la combustion de l'hydrogène.

hertz : unité de fréquence **(Hz)**, égale à un cycle par seconde, d'un phénomène alternatif. Parmi les principaux multiples, le **mégahertz** (1 **MHz** = 10^6 Hz) et le **gigahertz** (1 **GHz** = 10^9 Hz).

horizon cosmologique : terme désignant le fait qu'il peut ne pas être possible de communiquer avec des régions lointaines de l'Univers (**horizon futur** ou **horizon des événements**) ou qu'il n'a jamais été possible de recevoir de signaux de régions très éloignées (**horizon passé**).

hydrogène : **atome** le plus simple, formé d'un **proton** et d'un **électron**.

I

instabilité de Kelvin-Helmholtz : mouvement ondulaire, **turbulent**, qui se développe lors de la rencontre de deux fluides de densité ou de vitesse différentes.

interactions électromagnétique et faible : la théorie actuelle dit qu'il y a 4 interactions : **électromagnétique** (charges électriques, **champs magnétiques**, lumière...), **faible** (**radioactivité** bêta, réactions dans le **Soleil**, **neutrinos**, etc.), **forte** (cohésion des **noyaux**...), **gravitationnelle** ; les interactions électromagnétiques et faibles sont déjà unifiées par le **Modèle standard**.

interféromètre : dispositif dans lequel les **ondes électromagnétiques** peuvent se superposer. En astronomie, les modes de superposition des ondes offrent la possibilité de mesurer les dimensions angulaires d'un objet avec une très grande précision.

interférométrie radio : méthode de mesure exploitant les interférences entre plusieurs **ondes** cohérentes entre elles ; l'interférométrie est utilisée en astronomie (optique ou radioastronomie) pour obtenir une **résolution** équivalente à celle d'un miroir (ou d'un radiotélescope) de diamètre égal à l'écart entre les instruments combinés ; cela permet d'obtenir des instruments de haute résolution à partir d'un ensemble de petits télescopes, moins coûteux à fabriquer qu'un seul grand télescope.

ion : **atome** ou **molécule** qui a perdu ou gagné un ou plusieurs **électrons** et se trouve ainsi électriquement chargé (**cation** : ion positif ; **anion** : ion négatif).

ionisation : état de la matière où les **électrons** sont séparés des **noyaux** ; processus par lequel les **ions** sont produits, par collision avec des **atomes** ou des électrons (*ionisation collisionnelle*) ou par interaction avec un **rayonnement électromagnétique** (*photo-ionisation*).

isotopes : formes d'un même **élément** chimique dont les **noyaux** possèdent un nombre de **protons** identique (ainsi qu'un nombre identique d'**électrons** gravitant autour du noyau) mais un nombre de **neutrons** différent.

isotrope : qui présente les mêmes propriétés physiques dans toutes les directions (ant. **anisotrope**).

J

joule (J) : unité dérivée de travail, d'énergie et de quantité de chaleur du Système international. Le joule est défini comme étant le travail produit par une force de 1 newton dont le point d'application se déplace de 1 mètre dans la direction de la force ou celui fourni quand un courant de 1 ampère traverse une résistance de 1 ohm pendant 1 seconde.

K

kelvin : unité de température (symbole **K**). L'échelle kelvin a un seul point fixe qui est par convention la température thermodynamique du point triple de l'eau (où coexistent les phases solide, liquide et vapeur) à 273,16 K, soit 0,01 °C. 0 K = - 273,15 °C correspond au **zéro absolu** où toute forme de matière est figée.

Kevlar : matériau polymère appartenant au groupe des fibres aramides, qui offre d'excellentes propriétés mécaniques (fort module d'Young et charge à la rupture) et une très faible conductivité thermique.

L

lagrangienne (nature) : méthode de description physique d'un fluide qui consiste à suivre son mouvement au cours du temps ; à l'opposé, les méthodes eulériennes décrivent l'écoulement d'un fluide autour d'un point fixe ; l'évolution de la vitesse d'un bateau qui descend une rivière est une donnée lagrangienne tandis que l'évolution du débit de la même rivière au travers d'un barrage est une donnée eulérienne.

leptogenèse : mécanisme de **baryogenèse** dans lequel une **asymétrie leptonique** est formée puis partiellement convertie en **asymétrie baryonique** par les sphalérons.

limite de Chandrasekhar : masse maximale qu'un corps céleste, formé de matière dégénérée (**noyaux** et **électrons**, par exemple une **naine blanche**), peut soutenir grâce à la pression de dégénérescence électronique avant de succomber à l'effondrement **gravitationnel**.

lobe de Roche : région autour de Saturne (ou de toute **planète**), dans laquelle toute agglomération **gravitationnelle** est impossible en raison des **effets de marée**. Le lobe de Roche de Saturne fait environ 140 000 km (~ 2,5 rayons de Saturne). Édouard Roche (1820-1883) était un astronome français.

lois de Newton : ensemble de lois fondatrices de la mécanique écrites par Isaac Newton au 17e siècle. La première loi de Newton, ou principe de l'inertie (initialement formulé par Galilée), stipule

que le centre de **gravité** d'un solide soumis à une force résultante nulle est soit au repos, soit animé d'un mouvement rectiligne et uniforme. La deuxième loi de Newton exprime que la somme des forces appliquées à un objet ponctuel est égale au produit de la masse de l'objet par son vecteur accélération. Enfin, la troisième loi affirme que lorsqu'un solide S1 exerce une force sur un solide S2, le solide S2 exerce sur le solide S1 une force directement opposée. En ajoutant sa loi de la gravitation universelle à ces trois lois de la dynamique, Newton fut capable de démontrer que le mouvement des **planètes** autour du **Soleil** était des ellipses.

lumière Cherenkov ou Tcherenkov (du nom du physicien russe Pavel Cerenkov) **:** phénomène similaire à une **onde** de **choc**, produisant un flash de lumière qui a lieu lorsqu'une particule chargée se déplace dans un milieu avec une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière dans ce milieu. C'est cet effet qui provoque la luminosité bleue de l'eau entourant le cœur d'un réacteur nucléaire.

luminosité (d'une étoile ou d'une galaxie) : mesure de la puissance du rayonnement lumineux d'une **étoile** ou d'une **galaxie**, c'est-à-dire de l'énergie qu'elle émet en fonction du temps. Elle s'exprime en **watts (W)**. La **luminosité bolométrique** correspond à la luminosité sur l'ensemble du **spectre électromagnétique**. Les étoiles sont classées en fonction de leur luminosité (de I à VII). Les **supergéantes** de classe I sont les plus **brillantes**, puis viennent les **géantes** brillantes et normales (II et III), les sous-géantes (IV), les **naines** ou étoiles de la **séquence principale** (V), les sous-naines (VI) et les **naines blanches** (VII).

M

magnétohydrodynamique (MHD) : théorie analogue à l'hydrodynamique pour les fluides neutres qui permet d'étudier le comportement aux grandes échelles d'un fluide conducteur, métal liquide ou **plasma**.

magnétosphère : région de l'espace où le **champ magnétique** d'une **planète** domine celui du **vent solaire**, la protégeant des particules **ionisées** qui le constituent. Pour la Terre, elle se situe au-delà de l'*ionosphère*, à partir d'un millier de kilomètres de la surface, et s'étend jusqu'à la *magnétopause* qui la sépare de l'espace interplanétaire.

magnitude : échelle de **brillance** des objets astrophysiques. Les **étoiles** visibles à l'œil nu ont une magnitude généralement située entre 0 et 6.

matière noire : composante majeure de l'Univers, plus de six fois plus abondante que la matière visible ordinaire, elle a pour particularité de n'émettre aucun **rayonnement** et de n'interagir que par l'action de la **gravité**. Pour découvrir sa distribution dans l'espace, les astronomes utilisent notamment la déviation de la lumière qu'elle produit (**effet de lentille gravitationnelle**).

mégohm : unité de résistance électrique équivalant à un million d'**ohms**.

météorite : fragment d'**astéroïde** ou de **comète** de taille variable, rocheux ou métallique, circulant dans l'espace et capable d'atteindre la surface d'un astre.

micro : préfixe **µ** du millionième (10^{-6}). 1 **micromètre** (**µm**) ou **micron** = 10^{-6} mètre.

microquasars : systèmes binaires où un objet compact (**étoile à neutrons** ou **trou noir**), **accrétant** la matière de son étoile compagnon par le truchement d'un **disque d'accrétion**, provoque l'éjection de jets de matière à des vitesses proches de celle de la lumière.

mode de gravité : en mécanique des fluides, les **ondes** de **gravité** sont générées dans un milieu fluide (ondes internes) ou à l'interface entre deux milieux comme l'air et l'océan (ondes de surface) : c'est le cas des vagues ou des tsunamis. Dans une **étoile**, les modes de gravité sont des ondes stationnaires de basse fréquence dont la force de rappel est la poussée d'Archimède.

modèles de matière noire minimale : modèles proposés récemment en physique des particules pour expliquer la nature de la **matière noire** sans l'encadrer dans des théories complexes telles que la **supersymétrie** ou les **dimensions supplémentaires**.

Modèle standard de la physique des particules : théorie qui décrit les **interactions forte**, **faible** et **électromagnétique**, ainsi que l'ensemble des particules élémentaires qui constituent la matière.

modélisation : représentation simplifiée (**modèle**) d'un système ou d'un processus afin de le simuler, rassemblée dans un logiciel de calcul (souvent appelé **code**), sous forme d'expressions mathématiques. La taille de **maille**, dans l'espace et dans le temps, donne la **résolution** du modèle.

molécule : groupe d'**atomes** liés par des liaisons chimiques.

moment cinétique (ou angulaire) : mesure de l'énergie de rotation d'un système.

multiplexage : technique consistant à faire passer deux ou plusieurs informations à travers un seul support de transmission ; elle permet de partager une même ressource entre plusieurs utilisateurs. Il existe deux techniques principales de multiplexage : temporelle et fréquentielle (ou, ce qui revient au même, en longueur d'onde).

muon : nom donné à deux particules élémentaires de charge positive et négative selon le **Modèle standard**. Leur masse est 207 fois plus grande que celle de l'**électron** (c'est pourquoi on l'appelle aussi électron lourd) (105,66 **MeV**) et elles possèdent un spin 1/2. Les muons, tout comme les électrons, appartiennent à la même famille de fermions, les leptons. Les muons sont notés μ^- ou μ^+ suivant leur charge électrique.

N

naine blanche : petite **étoile** de faible **luminosité** avec une température de surface voisine de 20 000 **K**. Une naine blanche est une étoile chaude, stable, équilibrée par la répulsion entre ses **électrons**, qui, ayant épuisé son **combustible nucléaire**, se condense. Un tel astre, disposant d'une masse approximativement égale à celle du **Soleil** pour un rayon cent fois plus petit, atteint une densité un million de fois plus grande.

naines (étoiles) : étoiles de la **séquence principale** dont la classe de **luminosité** est V. Le **Soleil**, par exemple, est une **naine jaune**. Les **naines rouges**, quant à elles, très peu massives (entre 0,08 et 0,3 **masse solaire**) et d'une température de surface plus basse que 3 500 **K**, émettent peu de lumière. Leur température centrale n'est pas très élevée et la conversion de l'**hydrogène** en **hélium** s'y effectue à un rythme très lent. Il ne faut pas confondre les étoiles naines avec les **naines blanches** ou les **naines brunes** qui sont des états de l'évolution stellaire.

naines brunes : elles forment une classe d'astres originale, de masse intermédiaire entre les **planètes** et les **étoiles**. En raison de leur masse trop faible, la température et la pression en leur cœur ne sont pas suffisantes pour démarrer ou maintenir les réactions de **fusion thermonucléaire**.

nano : préfixe **n** du milliardième (10^{-9}) ; 1 **nanomètre** (**nm**) = 10^{-9} mètre.

nébuleuse : immense nuage de poussières et de gaz situé dans l'espace.

neutralino : nouvelle particule de la **supersymétrie** constituée d'un mélange des partenaires supersymétriques du **photon**, du **boson faible Z** et des **bosons neutres de Higgs** ; il a une charge électrique nulle et une masse prévue de l'ordre de 100 **gigaélectronvolts** ; il est le candidat le plus étudié au rôle de **matière noire**.

neutrino : particule élémentaire de masse très faible (longtemps supposée nulle). Les neutrinos sont émis dans les **réactions**

thermonucléaires au sein des **étoiles**, et en grand nombre lors de l'effondrement gravitationnel d'une **supernova**. Ils sont très difficiles à observer parce qu'ils interagissent très peu avec la matière.

neutron : particule électriquement neutre, 1 839 fois plus lourde qu'un **électron**. Les neutrons sont, avec les **protons**, les constituants des **noyaux atomiques**.

nombre de Reynolds (du nom d'Osborne Reynolds, ingénieur et physicien irlandais) **:** nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides.

noyau (atomique) : constituant essentiel d'un **atome**, chargé positivement et composé de **protons** et de **neutrons** (sauf pour l'**hydrogène**) auquel sont liés des **électrons**.

noyaux actifs (de galaxies) : trous noirs de masse comprise entre plusieurs millions et plusieurs milliards de **masses solaires**, émettant une énorme quantité d'énergie suite à des processus complexes d'**accrétion** de matière et de **magnétohydrodynamique relativiste**.

nucléons : particules constitutives du **noyau atomique**, liées entre elles par l'**interaction nucléaire forte** qui en assure la cohésion. **Protons** et **neutrons** sont des nucléons.

nucléosynthèse : ensemble de processus physiques responsables de la formation des **noyaux atomiques**.

nucléosynthèse primordiale : synthèse des **noyaux** de **deutérium**, d'**hélium 3**, d'**hélium 4** et de **lithium 7** en trois minutes lorsque la température de l'Univers primordial est passée de 10 à 1 milliard de degrés.

O

octet : unité de mesure en informatique mesurant la quantité de données. Un octet est lui-même composé de 8 bits, soit 8 chiffres binaires. Le byte, qui est un ensemble de bits adjacents, a presque toujours une taille d'un octet et les deux mots sont généralement, mais abusivement, considérés comme synonymes. Téraoctet : 10^{12}.

onde : mode de propagation d'un phénomène périodique vibratoire. Une onde est caractérisée par sa fréquence et par la longueur qui sépare deux maxima successifs de la vibration, appelée **longueur d'onde**.

onde de Jeans : onde qui se propage dans un milieu, sous l'effet de sa propre **gravité** et comporte des régions plus denses que la moyenne du milieu.

ondes d'Alfvèn (du nom de l'astrophysicien suédois Hannes Alfvèn) **: ondes** magnétohydrodynamiques ; dans un **plasma**, il s'agit d'une oscillation des **ions** et du **champ magnétique** qui se déplace.

ondes de Jeans-Toomree : ondes qui se forment quand, dans un disque, le matériau commence à s'agglomérer sous l'effet de sa propre **gravité**. Elles s'appellent ainsi d'après le nom des deux théoriciens qui, la première fois, ont décrit analytiquement ces structures.

opacité : capacité de la matière à **absorber** les **rayonnements**.

oscillation acoustique baryonique : pendant une longue période de l'histoire de l'Univers, les **baryons** et les **photons** sont en interaction ; il en résulte des oscillations comme celles de deux masses attachées par un ressort ; ces oscillations apparaissent dans la répartition de la matière dans l'Univers.

P

paire d'électrons-trous : dans un semi-conducteur, une partie de l'énergie déposée par un **photon** sert à arracher des **électrons** liés aux **atomes** dans la bande de valence pour les transférer comme **électrons libres** dans la bande de conduction. Un électron arraché laisse une vacance dans le cortège électronique de l'atome ou « trou » ; il faut une énergie minimum pour créer une paire d'électrons-trous de l'ordre de 1,1 **eV** pour le silicium.

parité de Kaluza-Klein : numéro quantique supplémentaire lié à la conservation de l'impulsion 5-dimensionnelle, introduit dans les théories avec **dimensions supplémentaires** ; il vaut +1 pour toutes les particules de la matière ordinaire et -1 pour les copies extra-dimensionnelles ; il doit être conservé dans tous les processus ; en conséquence, une particule de Kaluza-Klein ne peut pas se désintégrer dans des particules ordinaires : le processus de désintégration aurait une particule de parité de KK égal à -1 comme état de départ mais un ensemble de particules de parité de KK égal à +1 comme état d'arrivée, ce qui est interdit par la loi de conservation.

parsec (pc) : unité de longueur définissant la distance pour laquelle une **unité astronomique** (**1 ua**), qui est égale à la **distance entre la Terre et le Soleil**, soit environ 150 millions de kilomètres, est vue sous un angle de 1 seconde d'arc. 1 pc = 206 265 ua = 3,26 **années-lumière**.

pas de temps : étape de base d'une **simulation numérique** calculant l'évolution temporelle d'un système ; en partant d'un état initial, le programme calcule l'état du système au bout d'une durée relativement courte, ou « pas de temps », puis réitère le processus pour le « pas de temps » suivant.

photolithographie : procédé technologique permettant la fabrication de **pixels** à la surface d'un substrat semi-conducteur.

photométrie : mesure de l'intensité d'une source lumineuse.

photon : quantum (unité indivisible) d'énergie du **rayonnement électromagnétique**. Particule élémentaire, sans masse ni charge électrique, associée à un tel rayonnement.

photosphère (solaire) : surface visible du **Soleil**, marquant la frontière entre la zone opaque sous-jacente et la périphérie transparente.

photovoltaïque : effet qui permet de convertir directement la lumière en électricité par le biais de la production et du transport de charges électriques dans un matériau semi-conducteur comportant une partie présentant un excès d'**électrons** et une autre un déficit.

pixel : unité de surface permettant de définir la base d'une image numérique. Son nom provient de la locution anglaise *picture element*, qui signifie « élément d'image » ou « point élémentaire ».

planète : corps céleste non lumineux par lui-même et gravitant autour d'une **étoile**.

planétésimaux : petits corps rocheux du système solaire primordial qui se sont agglomérés pour former des **planètes**, leurs satellites et les **astéroïdes**.

plasma : gaz porté à une température telle que les **atomes** s'**ionisent**. Ses propriétés sont déterminées par les forces électromagnétiques parmi ses constituants (**ions** et **électrons**) d'où différents types de comportement. Considéré sur Terre comme le quatrième état de la matière, il en est dans l'Univers la forme principale.

points de Lagrange : du nom du mathématicien et astronome français d'origine italienne Joseph-Louis Lagrange (1736-1813), qui a déduit mathématiquement qu'un couple d'astres en interaction **gravitationnelle** possédait dans son voisinage cinq points d'équilibre ou points de Lagrange (L1 à L5). En ces points, les forces de gravitation de deux corps (les deux astres) alliées à la force centrifuge peuvent maintenir en équilibre un troisième corps placé sur le même plan orbital à condition que sa masse soit largement inférieure à la leur. De nombreux satellites se trouvent ainsi au **point de Lagrange L1**, situé entre le **Soleil** et la Terre, à 1,5 million de kilomètres de cette dernière. Le **point de Lagrange L2**, également situé à 1,5 million de kilomètres de la Terre, est symétrique de L1 par rapport à la Terre.

polarimétrie : science de la mesure de la **polarisation** de la lumière.

polarisation : en **électromagnétisme**, l'état de polarisation d'une **onde** est caractérisé par la façon dont évolue le **champ électrique** (et le **champ magnétique**) dans le plan d'onde, plan perpendiculaire à l'axe de propagation de l'onde. La figure décrite par le champ électrique peut être alors : un segment de droite, cas de la polarisation rectiligne ; une ellipse, cas de la polarisation elliptique ; un cercle, cas de la polarisation circulaire.

polarisé : dont le vecteur de champ électrique décrivant une vibration électromagnétique se situe dans un plan défini.

polyéthylène : un des polymères les plus simples (plastique inerte) qui appartient à la famille des polyoléfines.

primordial : qui correspond à la phase de l'évolution cosmique très dense, très chaude et très courte (quelques minutes) au cours de laquelle ont été fabriqués les **éléments** les plus **légers** de l'Univers (**deutérium**, **hélium**).

principe anthropique : l'Univers doit être tel que l'existence d'observateurs est permise ; en particulier, les constantes de la nature, comme la constante de structure fine, ne peuvent que peu différer de leurs valeurs mesurées sous peine d'interdire l'existence des **noyaux atomiques**, des **atomes**, etc., rendant ainsi impossible la présence d'observateurs ; appliqué à la **constante cosmologique**, l'existence des **galaxies** implique que celle-ci est forcement bornée par 100 fois la valeur de l'énergie des constituants de l'Univers actuel.

principe cosmologique : l'Univers est **isotrope** et homogène ; l'**isotropie** signifie qu'aucune direction n'est privilégiée ; l'homogénéité correspond à l'absence de point particulier dans l'Univers ; le principe de Copernic énonce que la Terre n'a pas de position privilégiée dans l'Univers.

principe de moindre action et lagrangien : en optique, les rayons lumineux obéissent au principe de Fermat selon lequel ils minimisent le chemin optique entre deux points ; les théories de particules suivent le même schéma ; dans ce cas, le mouvement des particules (ou de leurs champs associés) extrémisent l'action de la particule qui n'est autre que l'intégrale (au sens mathématique) du lagrangien.

proton : particule constitutive du **noyau atomique** (**nucléon**) portant une charge électrique positive égale et opposée à celle de l'**électron**. Un proton est 1 836 fois plus lourd qu'un électron.

pulsar (de *pulsating radio source*) : **étoile à neutrons**, tournant très rapidement sur elle-même, émettant un fort **rayonnement électromagnétique** dans la direction de son axe magnétique.

Q

quantique : qui relève de la théorie développée à partir du principe des *quanta* de Planck (toute manifestation de l'énergie ne peut s'exprimer que par une valeur discrète (discontinue) appelée quantum (unité indivisible)) et du *principe d'incertitude d'Heisenberg* selon lequel il n'est pas possible de mesurer en même temps avec précision la position et la vitesse d'une particule.

quasars : objets extrêmement **lumineux** situés au centre de certaines **galaxies**, compacts et pleins d'énergie. Les quasars très lointains témoignent des premiers âges de l'Univers.

R

radiateur passif : refroidisseur entièrement passif utilisant les échanges **radiatifs** (échange de chaleur par rayonnement avec une source à température plus froide).

radiation : énergie émise sous forme de rayonnement.

radiative (région ou zone) : zone proche du cœur, où le gaz est fortement **ionisé** et l'énergie transportée par diffusion des **photons**.

radioactivité naturelle : radioactivité due à des sources non produites par des activités humaines (radon, **rayonnement cosmique**).

rayonnement cosmique : flux de particules chargées (**protons, noyaux** d'**hélium** et d'**éléments lourds**) traversant l'espace interstellaire à des vitesses **relativistes**.

relativiste : se dit de phénomènes impliquant des vitesses proches de celle de la lumière. La matière est dite relativiste lorsque la vitesse avoisine celle de la lumière.

résolution angulaire : plus petite séparation angulaire entre deux objets, qui caractérise en particulier l'aptitude d'un système optique à distinguer ou à reproduire les détails d'une scène ou de son image. Elle s'exprime en **minute d'arc** ou en **seconde d'arc**, chaque minute d'arc étant divisée en soixante secondes d'arc.

R-parité : numéro quantique supplémentaire introduit en **supersymétrie**. Il vaut +1 pour toutes les particules de la matière ordinaire et il vaut -1 pour les partenaires supersymétriques. Il doit être conservé dans tous les processus. En conséquence, une particule supersymétrique ne peut pas se désintégrer dans des particules ordinaires : le processus de désintégration aurait une particule de R-parité égal à -1 comme état de départ mais un ensemble de particules de R-parité égal à +1 comme état d'arrivée, ce qui est interdit par la loi de conservation.

S

séquence principale : région du **diagramme de Hertzsprung-Russell** où se trouvent regroupées les **étoiles** dont la source d'énergie est la **fusion** de l'**hydrogène** en **hélium** : parmi elles, le **Soleil** actuel. Les étoiles d'une composition chimique donnée s'installent en fonction de leur masse sur une ligne appelée **séquence principale d'âge zéro** ou ZAMS (*Zero Age Main Sequence*).

signal stochastique : signal aléatoire variant dans le temps. Il se rencontre dans beaucoup de domaines : en physique, en électronique, en chimie et même en musique. Les bulles **convectives** à la surface d'une **étoile** excitent stochastiquement les **ondes** qui se propagent.

simulation numérique : reproduction par le calcul du fonctionnement d'un système, préalablement décrit par un **modèle** ou un ensemble de modèles.

Soleil : **étoile** moyenne de **type spectral** G2V, située au cœur de la **séquence principale** du **diagramme de Hertzsprung-Russell**. Il est **âgé** de 4,6 milliards d'années. Son **rayon** est de 700 000 km, sa **masse** d'environ $2 \cdot 10^{30}$ kg, et sa **température de surface** atteint 5 770 **K**. Sa **luminosité** est de $3{,}8 \cdot 10^{26}$ **watts**. La **distance entre la Terre et le Soleil** est voisine de 150 millions de km, soit 1 **unité astronomique (ua)**.

spectre CMB (pour *Cosmic Microwave Background* ou fond diffus à micro-ondes) : le fond diffus cosmologique est le nom donné au **rayonnement électromagnétique** issu de l'époque dense et chaude peu après le **big bang** ; bien qu'issu d'une époque très chaude, ce rayonnement a été dilué et refroidi par l'expansion de l'Univers et possède désormais une température très basse de 2,726 **K** ; la mesure précise de ses propriétés par le satellite WMAP (pour *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) a permis de contraindre de façon très précise les paramètres de l'évolution de l'Univers.

spectromètre à résonance : cet instrument a été inventé pour étudier les déplacements en vitesse des couches superficielles de l'atmosphère solaire. Appliqué à des **raies** bien connues en laboratoire (sodium, potassium, fer, nickel), il a l'avantage de fournir des précisions **atomiques**.

spectrométrie dispersive en énergie : spectrométrie réalisée au niveau du détecteur sans nécessité d'utiliser un dispositif optique comme des réseaux ou des cristaux de Bragg ; l'énergie se mesure en inventoriant le nombre de **paires d'électrons-trous**, de **photons** de scintillation, de paires d'électrons-**ions** créées

suivant que l'on utilise un semi-conducteur, un scintillateur ou un compteur à gaz.

sublimation : processus par lequel un corps passe directement de l'état solide à l'état gazeux.

supergéantes (étoiles) : **étoiles** dont la masse varie entre 10 et 70 **masses solaires**, la **luminosité** entre 30 000 et plusieurs millions de fois la **luminosité solaire** et la taille entre 30 à 500, voire plus de 1 000 **rayons solaires**.

supernova : explosion d'une **étoile** au cours de laquelle la **luminosité** dans le **visible** augmente considérablement, ce phénomène se produisant à la fin de l'évolution de certaines étoiles. Les **supernovae de type Ia** signalent la désintégration d'une petite étoile compacte, une **naine blanche**, rendue instable par une accumulation de matière venant d'un compagnon, sa masse ayant alors atteint la **masse critique de Chandrasekhar** (1,44 fois la **masse solaire**). Les **supernovae de type II** marquent au contraire l'explosion d'une étoile massive (au moins 8 fois la masse solaire). Une grande partie de l'étoile est expulsée et il subsiste une **étoile à neutrons** ou un **trou noir**.

sursauts gamma (*gamma-ray bursts*) : phénomènes les plus violents de l'Univers, ces sources transitoires se manifestent par des éruptions brutales dans le domaine des **rayons gamma**.

synchrotron (rayonnement ou émission) : **rayonnement électromagnétique** émis par des particules électriquement chargées se déplaçant à des vitesses **relativistes** dans un **champ magnétique**.

système binaire : système de deux **étoiles** orbitant autour de leur centre de **gravité** commun. Les systèmes binaires serrés peuvent échanger de la matière par le phénomène d'**accrétion**.

T

tachocline : zone de transition à la base de la **zone convective solaire** entre la rotation différentielle de la zone convective et celle solide du **cœur radiatif** ; le terme vient de la racine *tacho* qui signifie « vitesse » et de *cline*, « pente » : il s'agit donc de la pente de vitesse, c'est-à-dire du cisaillement : cette couche limite joue un rôle important dans l'organisation du **champ magnétique** solaire à grande échelle.

température effective : température d'un **corps noir** qui émettrait la même quantité de **rayonnement électromagnétique** que l'objet étudié. Elle est utilisée pour estimer la température d'un objet quand la courbe d'**émissivité** (en fonction de la longueur d'onde) est inconnue.

théorème d'Ostrogradski : il énonce que modifier la **relativité générale** sans conduire à une instabilité de l'Univers est très délicat ; seul un type de théories appelé « tenseur-scalaire » répond à ce critère.

théorie de la relativité générale : énoncée par Albert Einstein (et David Hilbert) en 1915, la relativité générale réconcilie la **relativité restreinte**, décrite en 1905 par Albert Einstein, et la théorie de la gravité. Elle est basée sur le principe d'équivalence qui énonce qu'il est impossible de distinguer un champ **gravitationnel** du mouvement accéléré d'un observateur. Ceci est souvent illustré en disant qu'un expérimentateur dans un ascenseur ne peut déterminer si l'ascenseur est soumis à une force de **gravité** ou s'il évolue selon un mouvement accéléré. La relativité générale est utilisée pour décrire l'évolution de l'Univers.

théorie de la supersymétrie : théorie proposée, dans les années 1980, en physique des particules, pour expliquer notamment la masse prévue du **boson de Higgs**. Elle propose de doubler les ingrédients du **Modèle standard** : chaque particule de la matière ordinaire aurait un partenaire supersymétrique, avec les mêmes propriétés mais beaucoup plus lourd. Ces partenaires peuvent être produits dans des processus physiques de haute énergie, tels que notamment les collisions qui auront lieu au LHC.

théorie des cordes : tentative d'unification des lois de la **relativité générale** et de la mécanique **quantique** ; pour ce faire, les particules ne sont plus ponctuelles mais deviennent des cordes microscopiques.

théorie MOND (pour *Modified Newtonian Dynamics*/ dynamique de Newton modifiée) : il s'agit d'une théorie avancée par le chercheur israélien Mordehai Milgrom dans les années 1980 qui propose de modifier la **loi de Newton** (très bien confirmée jusqu'à aujourd'hui dans toutes les observations astronomiques) pour expliquer les courbes de rotations de **galaxies** sans introduire de la **matière noire**.

thermodynamique : branche de la physique qui décrit les transferts d'énergie au sein de la matière.

transformée de Fourier : décomposition d'une fonction mathématique quelconque en une somme de fonctions sinus et cosinus.

transformée de Ridgelet : permet une analyse optimale des ruptures linéaires dans une image.

transformée en ondelette : comme la **transformée de Fourier**, il s'agit d'une transformation d'un espace d'entrée (espace-temps) vers un autre espace (espace fréquentiel).

trou noir : astre si compact qu'il produit une **attraction gravitationnelle** si intense que ni la matière ni la lumière ne peuvent plus s'en échapper. Dans la **Voie lactée**, certains trous noirs résultent de l'effondrement d'une **étoile** de plus de 10 **masses solaires** (**trous noirs stellaires**). Un trou noir de plusieurs millions de fois la masse du Soleil est présent au centre de la Voie lactée.

turbulence : mode d'écoulement d'un fluide dans lequel se superpose au mouvement moyen un mouvement d'agitation aléatoire.

type spectral : il permet de classer les **étoiles** en température, des plus chaudes aux plus froides (O B A F G K M R N S H). Chaque type spectral est affiné en ajoutant un nombre compris entre 0 et 10 (par exemple une étoile A5 est un peu plus chaude qu'une A6). La **classe de luminosité** y est souvent adjointe. Le **Soleil** est ainsi une G2V, c'est-à-dire une étoile G2 de la **séquence principale**.

V

variable semi-régulière (étoile) : **étoile géante** ou **supergéante** de **type spectral** intermédiaire qui présente une périodicité marquée dans sa variation de **luminosité**, accompagnée ou parfois interrompue par diverses irrégularités.

vent solaire : flux de particules énergétiques chargées, principalement des **protons** et des **électrons** formant un **plasma**, qui émane de la **couronne solaire** à des vitesses de plusieurs centaines de kilomètres par seconde.

vent stellaire : flux intense de particules émis par les **étoiles** tout au long de leur évolution. Certaines étoiles massives éjectent de la matière avec un débit pouvant atteindre un cent millième de **masse solaire** par an à des vitesses de plusieurs milliers de kilomètres par seconde.

viscosité : mesure de la capacité d'un fluide à s'écouler.

Voie lactée : nom donné à notre Galaxie, grand **disque**, en rotation sur lui-même, constitué d'un peu plus de deux cents milliards d'**étoiles**. C'est une **galaxie spirale**.

W

WIMP (pour *Weakly Interacting Massive Particle*) : particule lourde ayant des **interactions faibles**, donc n'importe quelle particule sensible à la force faible et caractérisée par une masse très grande, de l'ordre de 100 **gigaélectronvolts**.