



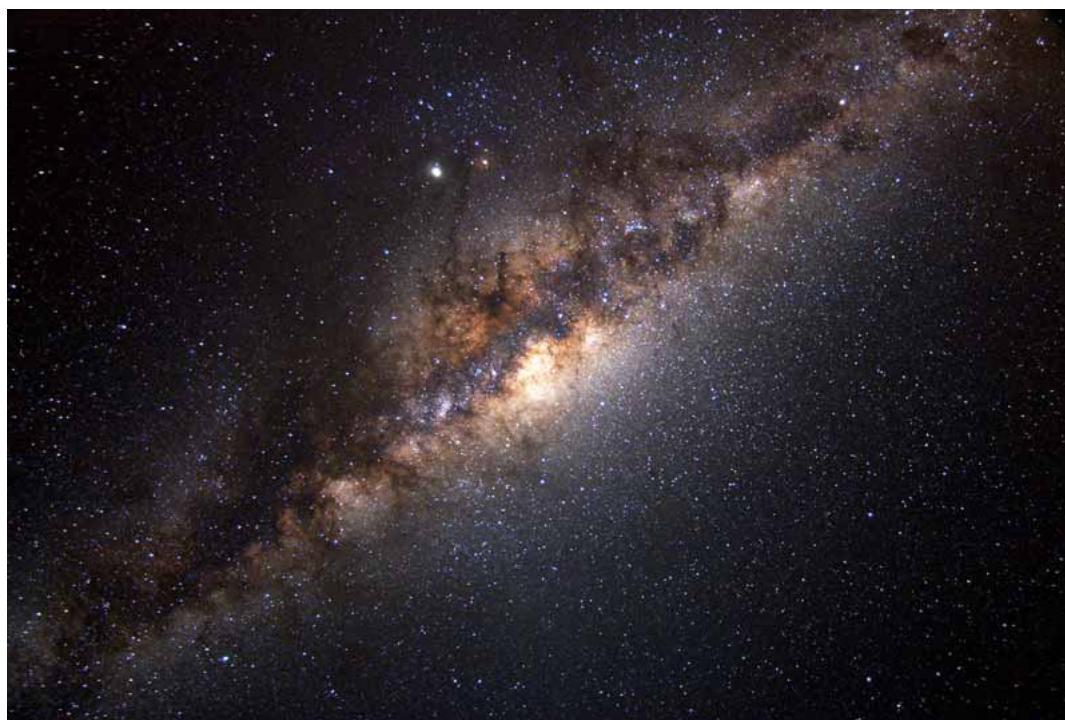
Notre Galaxie, la Voie lactée, a la forme d'une belle spirale bien dessinée. Ce disque en rotation composé de gaz et de plus de deux cents milliards d'étoiles est en effet parcouru, très lentement, par des ondulations où se concentrent les étoiles les plus jeunes et les plus lumineuses, qui matérialisent 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 ».

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.



Serge Brunier

L'observateur du ciel nocturne connaît bien la **Voie lactée**, cette bande lumineuse 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.



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.

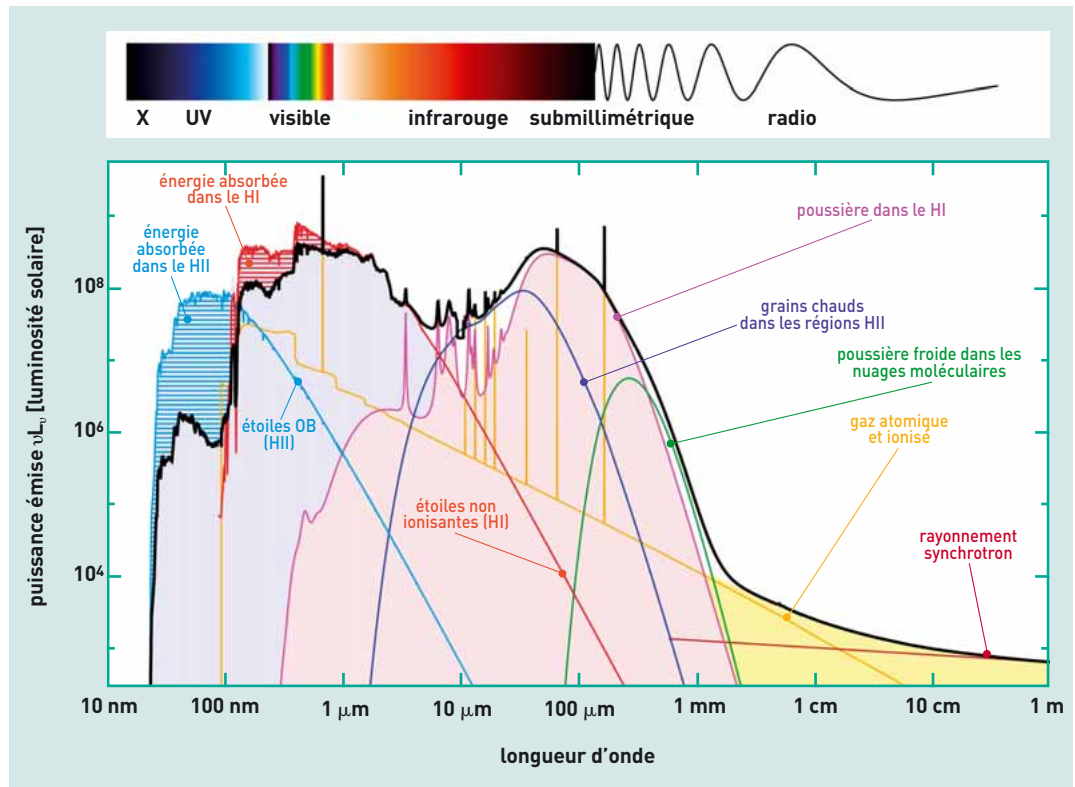
Les nuages interstellaires des régions HII sont principalement composés d'hydrogène dont la plupart des atomes sont ionisés par le **rayonnement ultraviolet** d'étoiles de **type spectral O** et B, tandis que ceux des régions HI sont constitués d'hydrogène atomique neutre.

(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,

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

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 %.

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 inconnue 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 morphogénèse des galaxies*, p. 60).

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

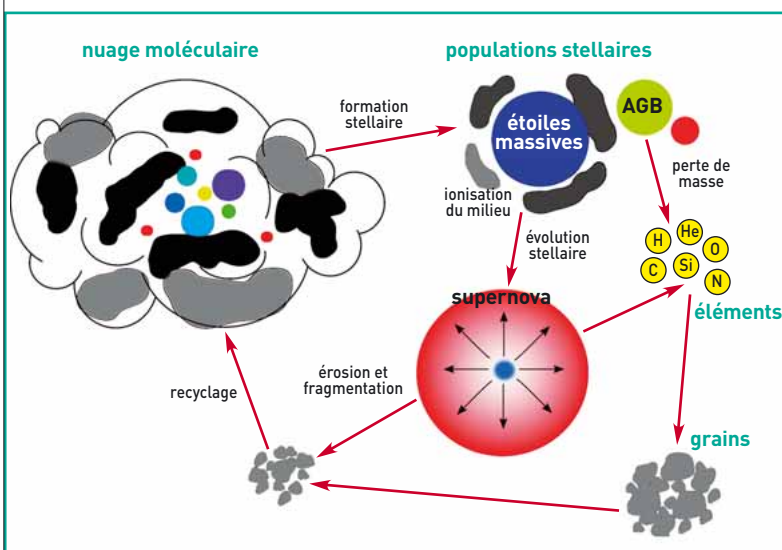


Figure 3.

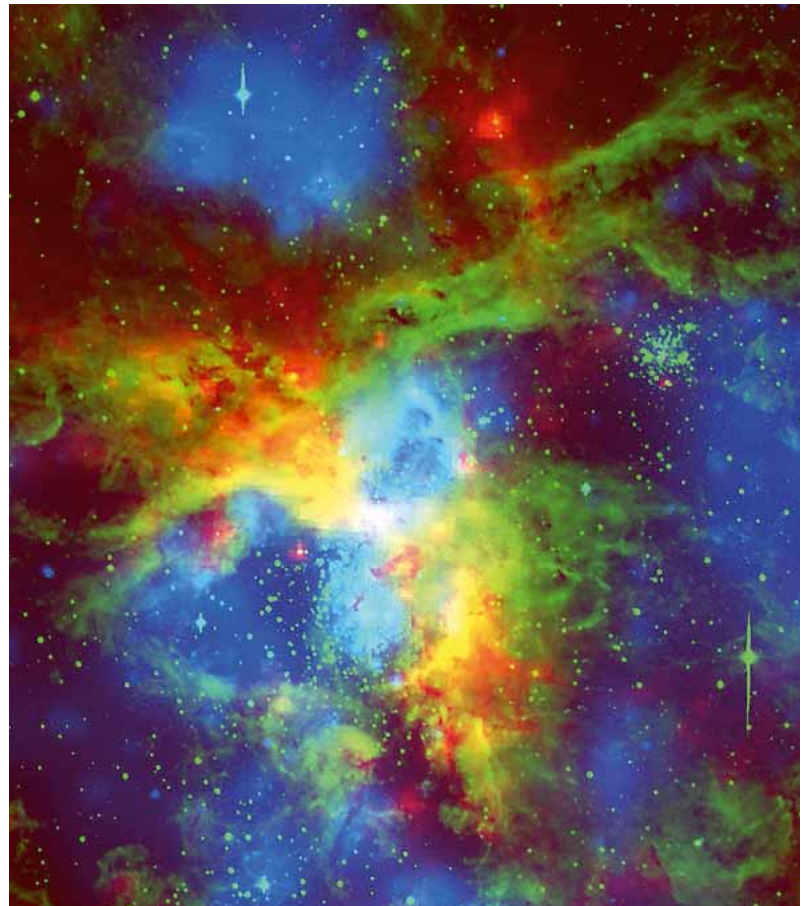
Le cycle de l'évolution stellaire et son effet sur la composition des galaxies. La formation et l'évolution des étoiles contribuent à modifier, non seulement la composition chimique des galaxies, mais aussi leur contenu énergétique. La population stellaire AGB correspond aux étoiles de faible masse,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

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.

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



R. INDEBETROW 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.

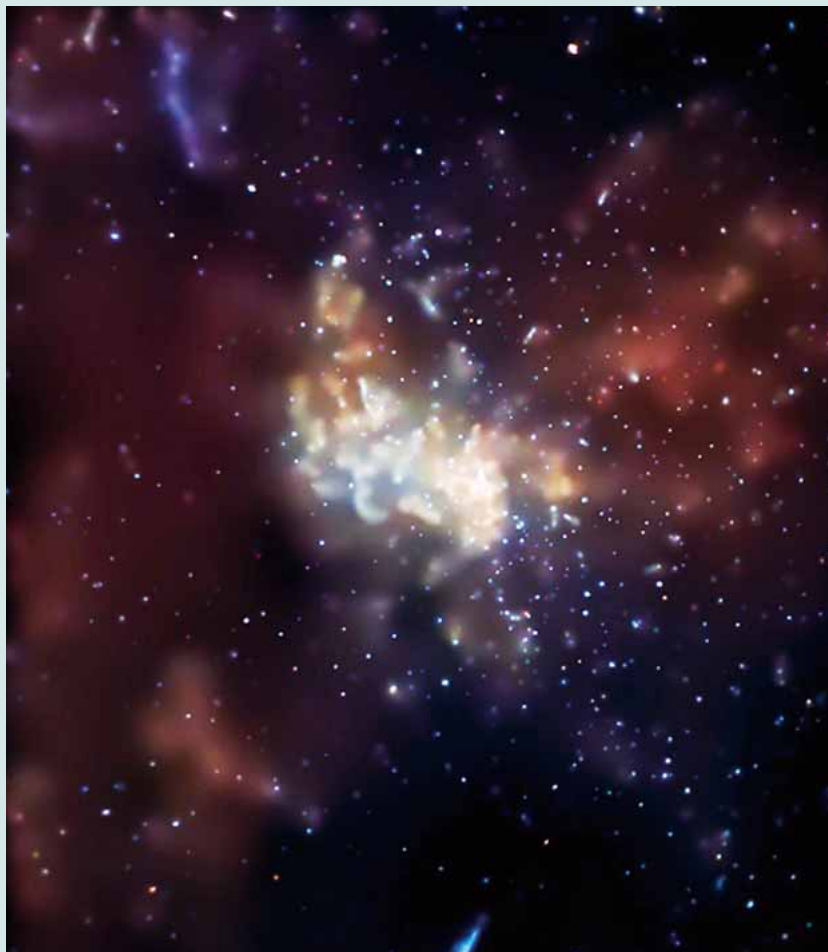
grains de poussière, ce qui modifie leur émission. Enfin, les supernovae représentent un des principaux sites de génération et d'accélération des **rayons cosmiques**, ces **noyaux atomiques** qui voyagent sur des distances parfois plus grandes que les galaxies elles-mêmes et qui, déposant une partie 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 (CEA¹-Université Paris 7- CNRS²)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Un trou noir mystérieux



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.

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.

(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.

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

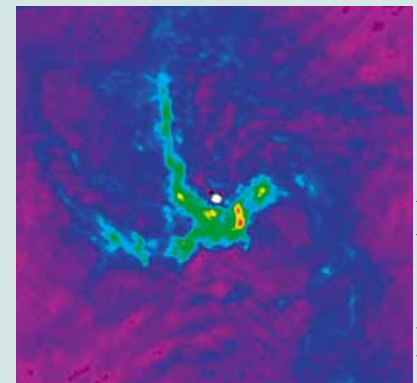


Figure 1. Image radio du centre de la Galaxie montrant la nébuleuse spirale et la source compacte Sgr A* (point blanc au centre de l'image).

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

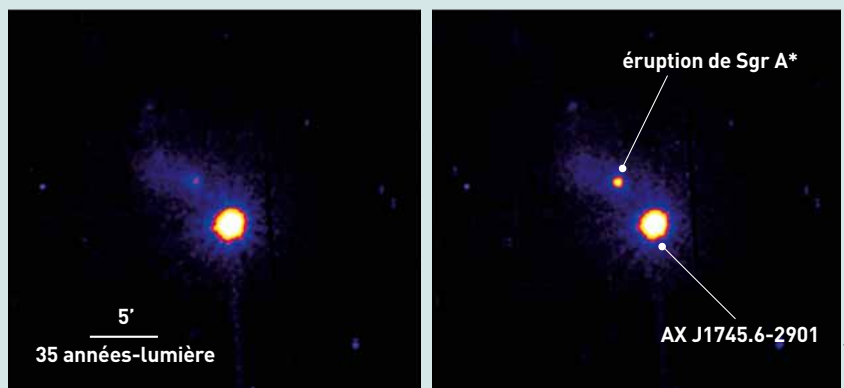


Figure 2. Le centre de la Galaxie vu par le télescope XMM-Newton en avril 2007 (caméra EPIC PN, rayons X de 2 à 10 keV), avant (à gauche) et pendant (à droite) une éruption X de Sgr A*. La position de la source radio Sgr A* est indiquée et témoigne que l'éruption X est bien associée au trou noir – non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

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)

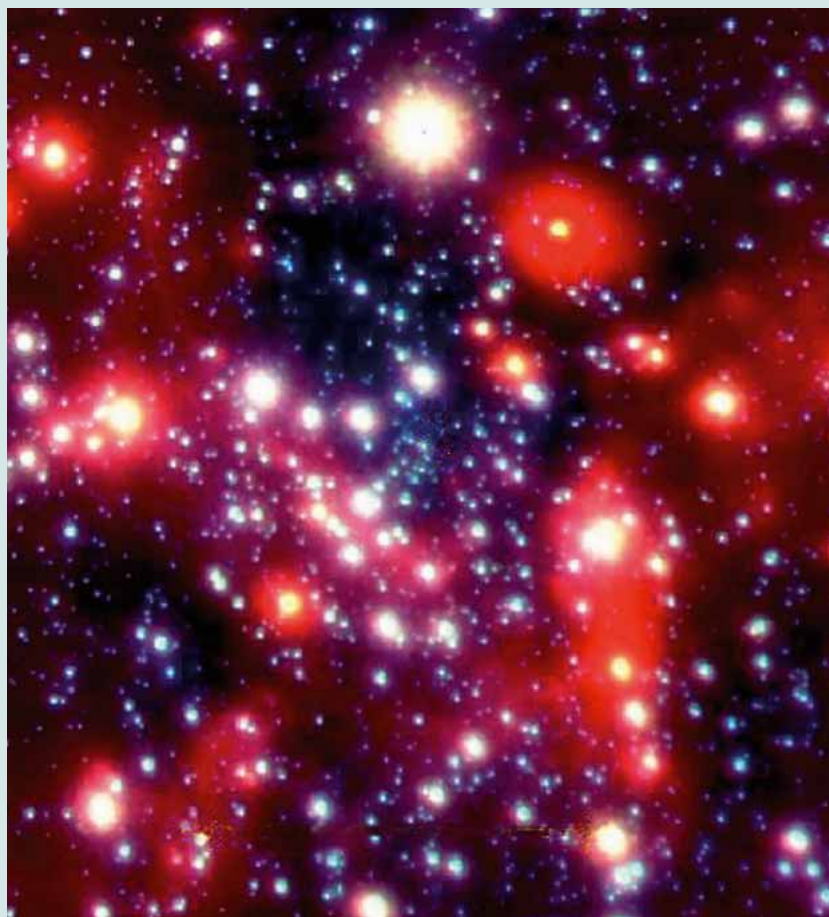


Image du centre galactique prise avec la caméra infrarouge NACO montée au foyer du télescope Yepun du Very Large Telescope (VLT) de l'ESO, installé sur le mont Paranal au Chili. Elle montre les étoiles les plus lumineuses de la région qui nourissent, avec leurs puissants vents stellaires, le trou noir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

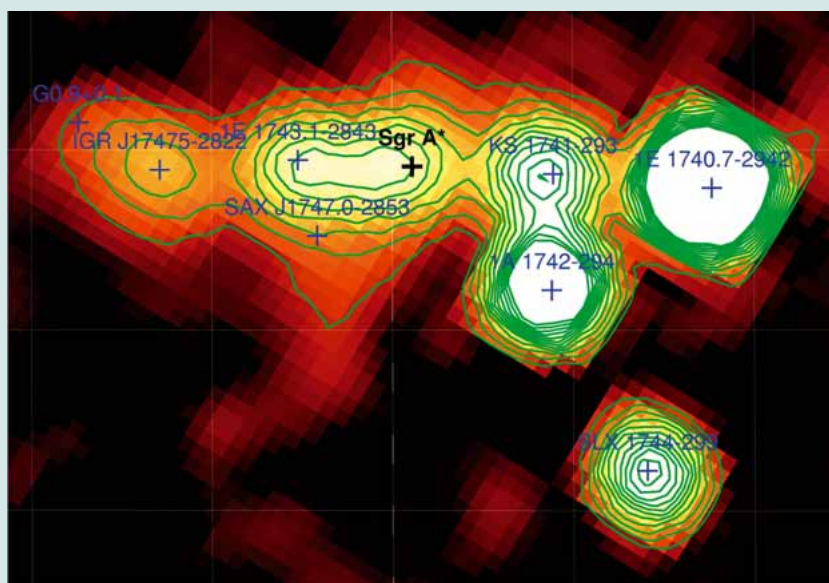
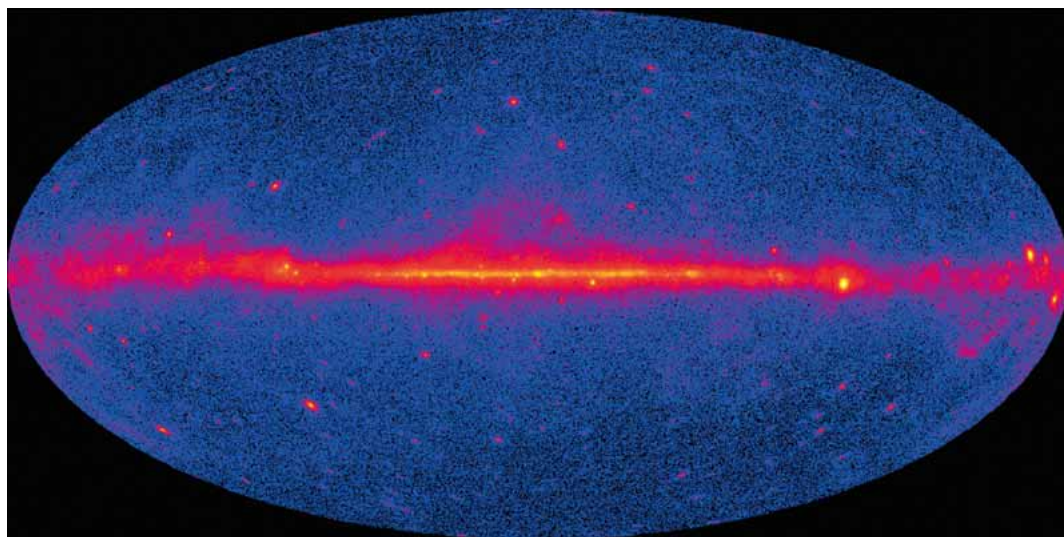


Figure 3. Image (avec contours d'intensité) de la région centrale de la Galaxie enregistrée par le télescope IBIS d'INTEGRAL (rayons gamma de 20 à 40 keV). La position de Sgr A* est indiquée et montre que la source gamma au centre pourrait être liée au trou noir supermassif. Les autres sources gamma 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.

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.



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

Les **rayons cosmiques** ont été baptisés ainsi lors de leur découverte au début du 20^e 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/c²) 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.



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.

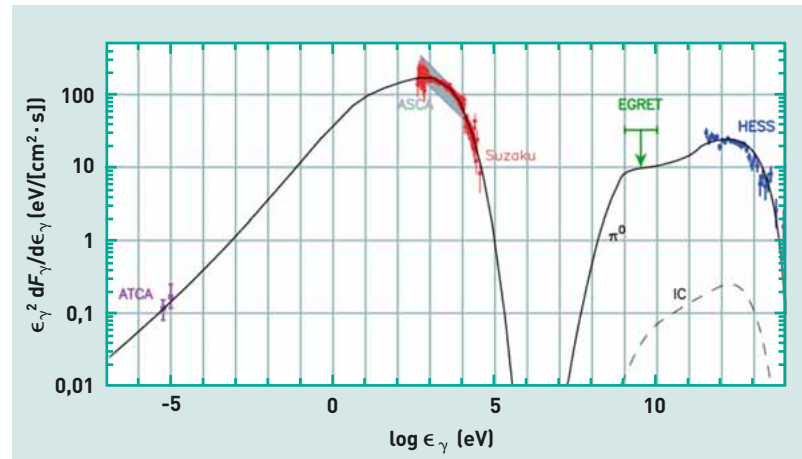


Figure 2. Spectre du reste de supernova RX J1713.7-3946 sur tout le domaine électromagnétique. Les points de mesure (en couleur) sont dans les domaines radio, X et gamma. La première bosse [des ondes radio aux rayons X] correspond à l'émission synchrotron des électrons accélérés. La deuxième bosse (en 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

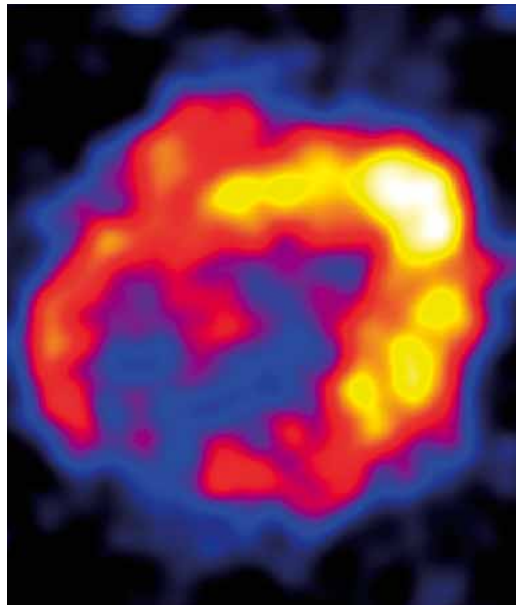
Les astrophysiciens commencent donc à bien cerner le mécanisme d'accélération des rayons cosmiques, d'autant que l'observation de plusieurs restes de supernovae, dont SN 1006 en 2008, en rayons gamma par l'instrument HESS (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90) fournit de nouvelles données (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

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



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.

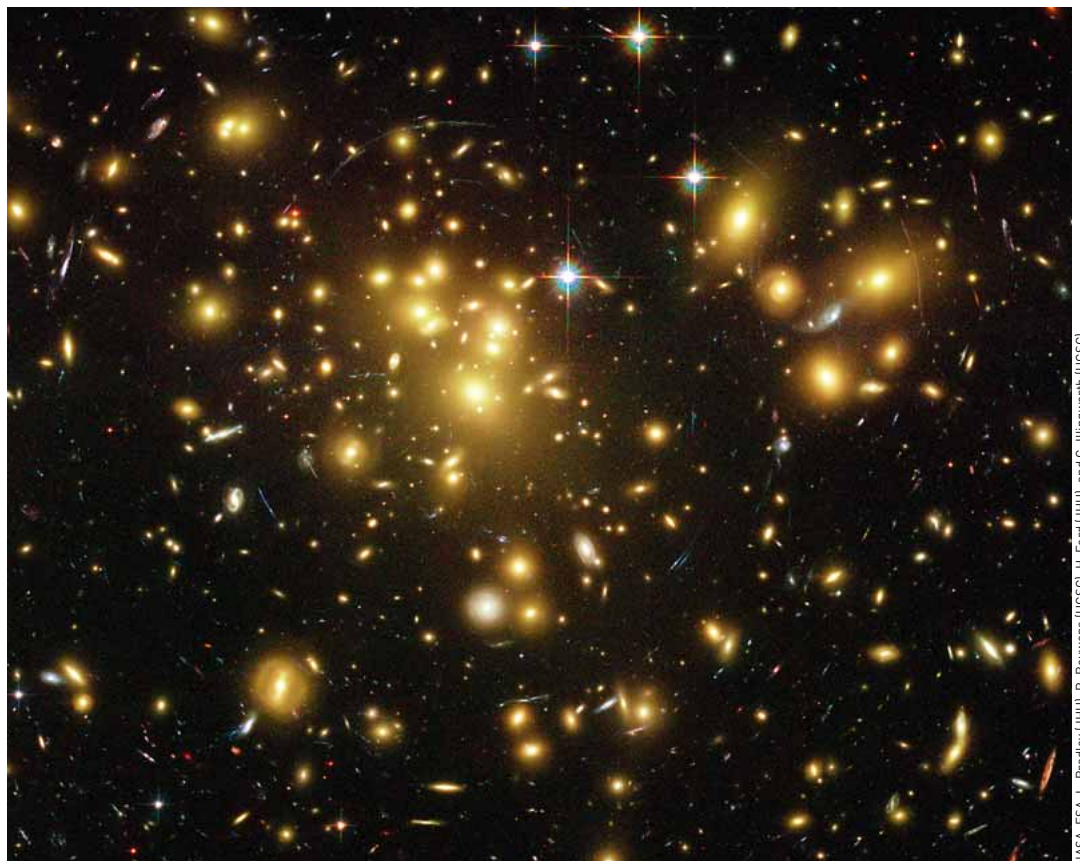
un modèle global de reste de supernova. Ils vont dès maintenant approfondir leurs études en rayons X et, dans le cadre d'un grand projet sur SN 1006, sonder ce reste de supernova avec l'observatoire XMM-Newton, dont la sensibilité devrait apporter des réponses sur la rétroaction et l'orientation du champ 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.



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.

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

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 – diminuent, 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

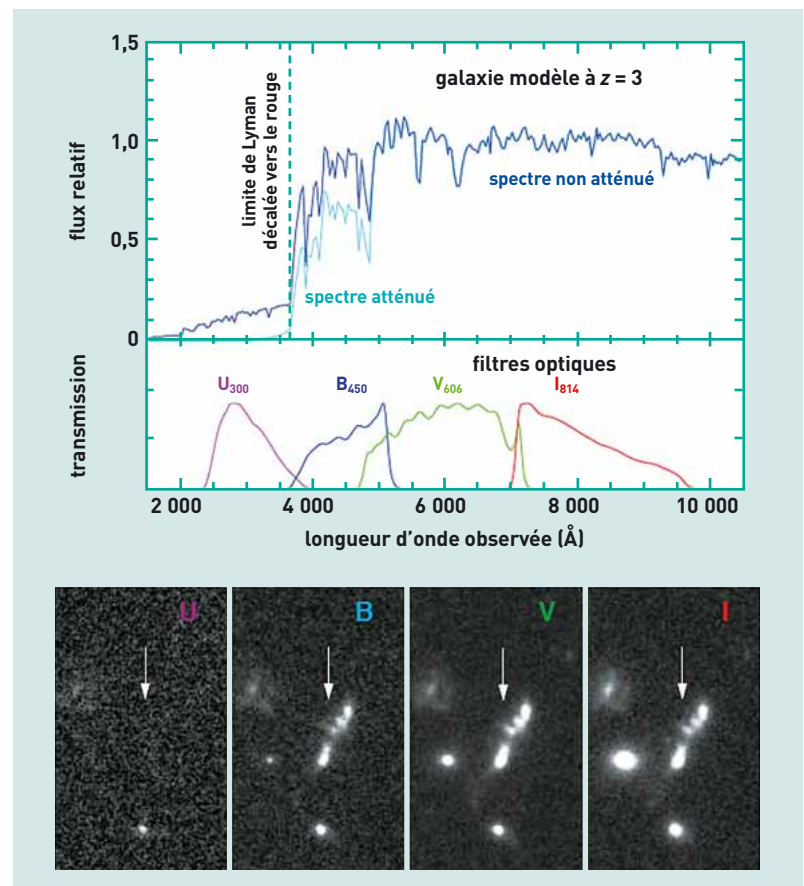
Le fond diffus cosmologique, émis par un Univers âgé de 380 000 ans, a une valeur de z légèrement supérieure à 1 000. Pour la plupart des galaxies et étoiles recensées, z varie de 0 à 3. Cette dernière valeur correspond à un Univers âgé d'environ 2,2 milliards d'années. Les cosmologistes considèrent 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 3×3 arcmin², 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.



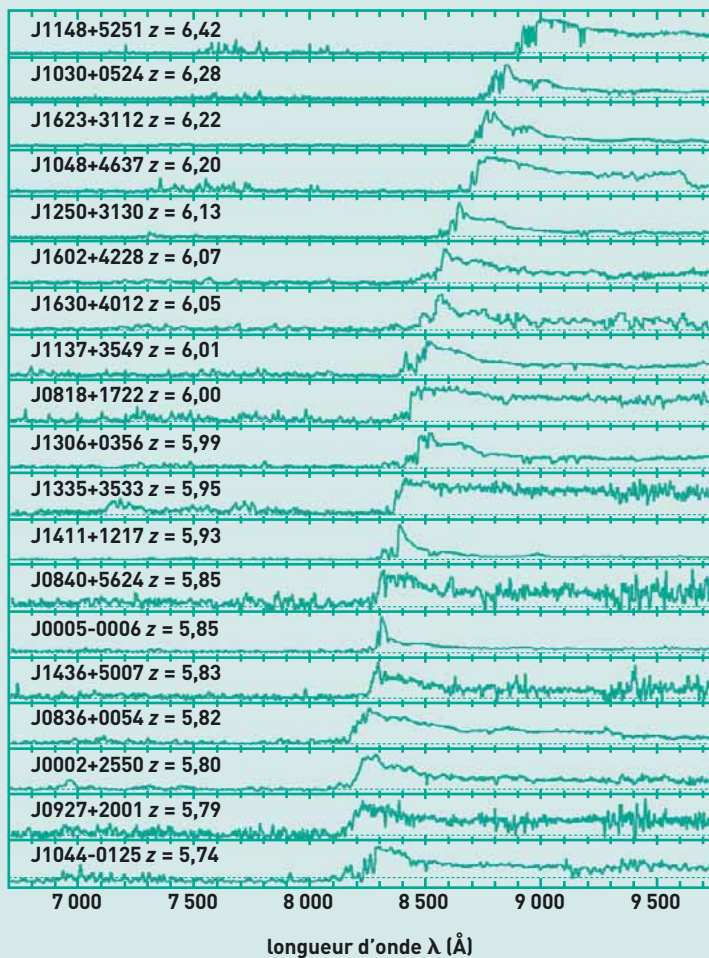
(M. Dickinson, Proceedings Symposium "The Hubble Deep Field", May 1997, STScI, eds. M. Livio, S. M. Fall and P. Maddau)



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.

intensité lumineuse associée à une longueur d'onde λ



(FAN, Xiaohu 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⁾.

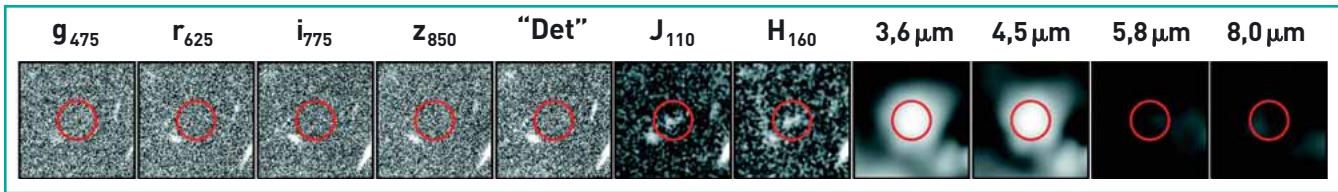
La course aux premières galaxies

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 d'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.

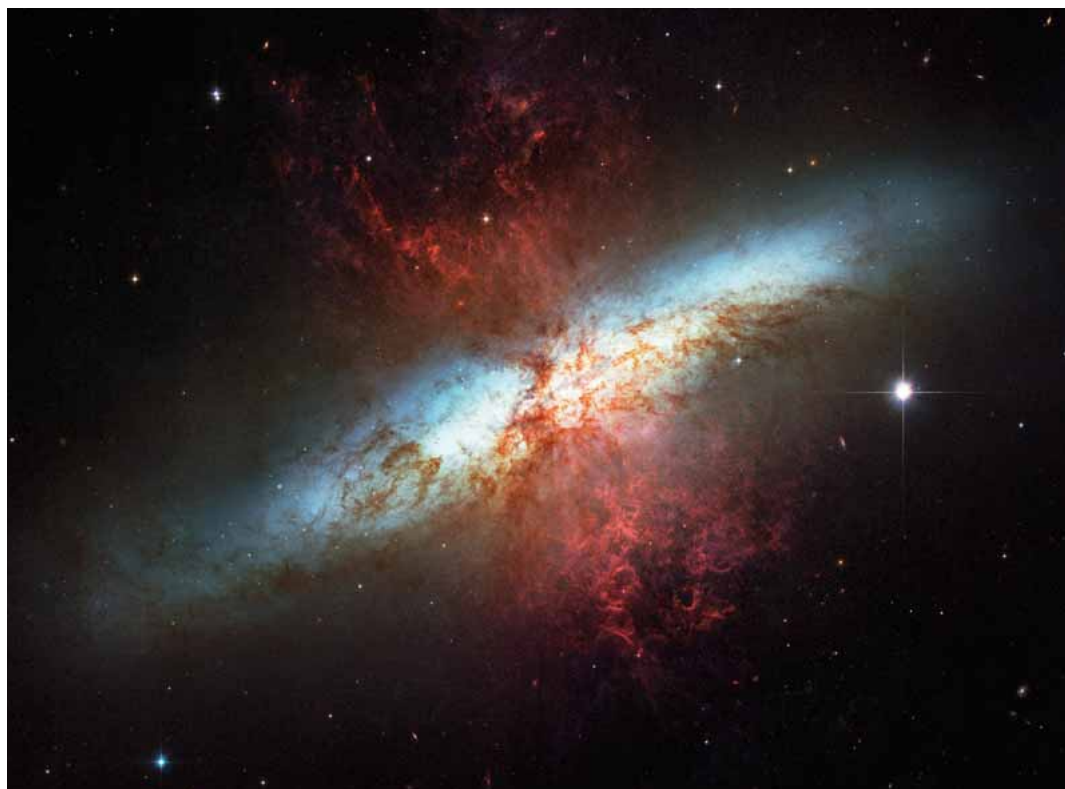
> Emanuele Daddi

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...

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.



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

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 multicolores 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.

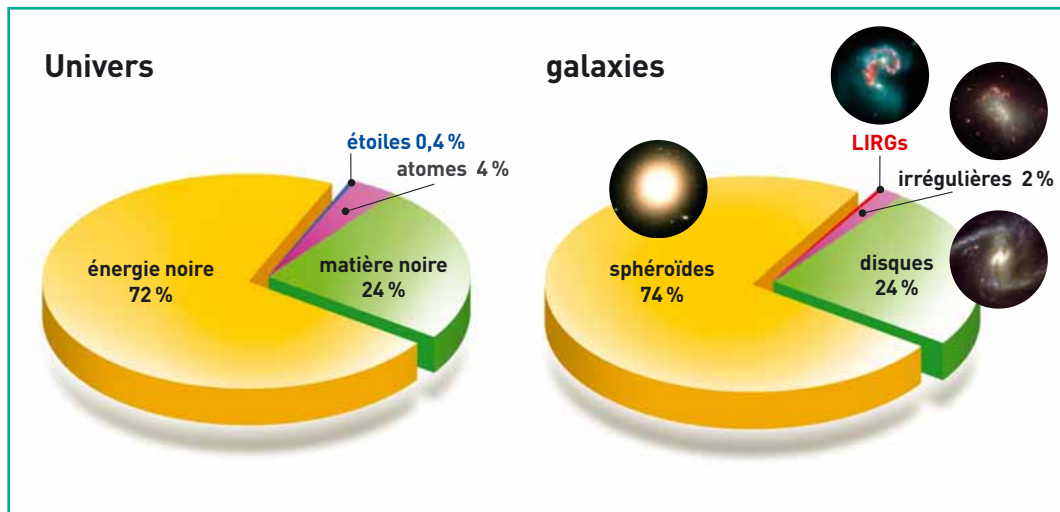


Debra Meloy Elmegreen (Vassar College) et al., NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI)

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.

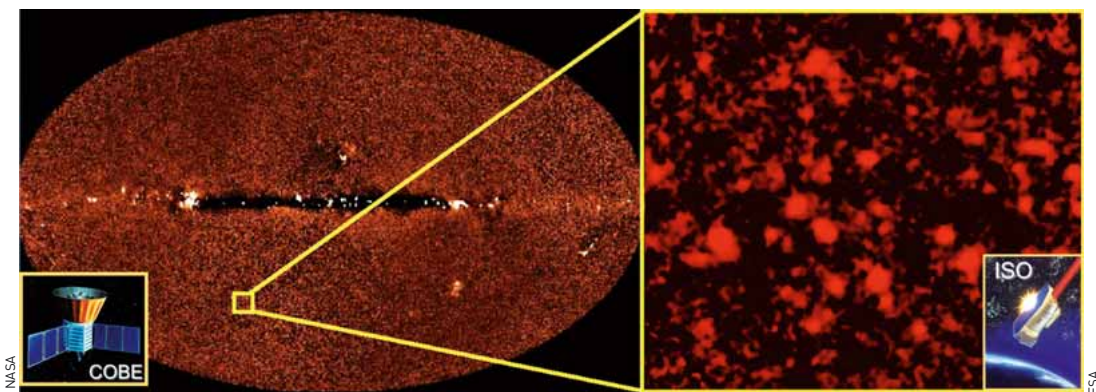


Figure 2. Le fond diffus infrarouge mesuré par le satellite de la NASA COBE (à gauche) et sa résolution en galaxies individuelles par le satellite de l'ESA ISO (à droite).

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⁽⁴⁾, 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

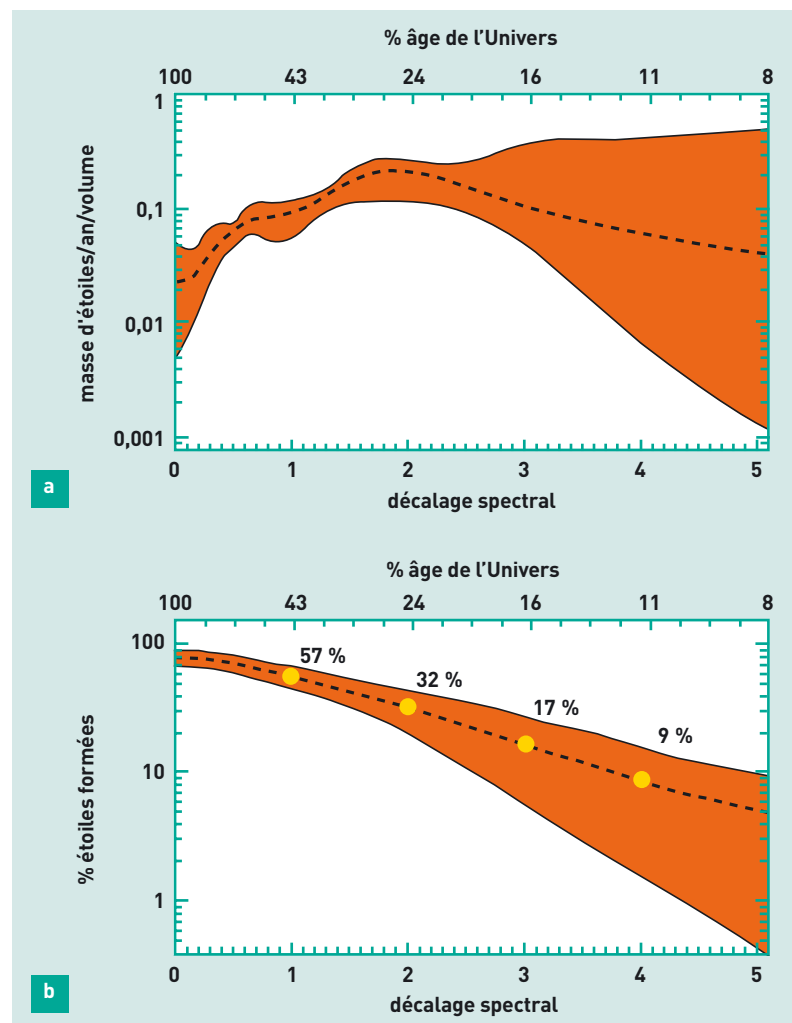
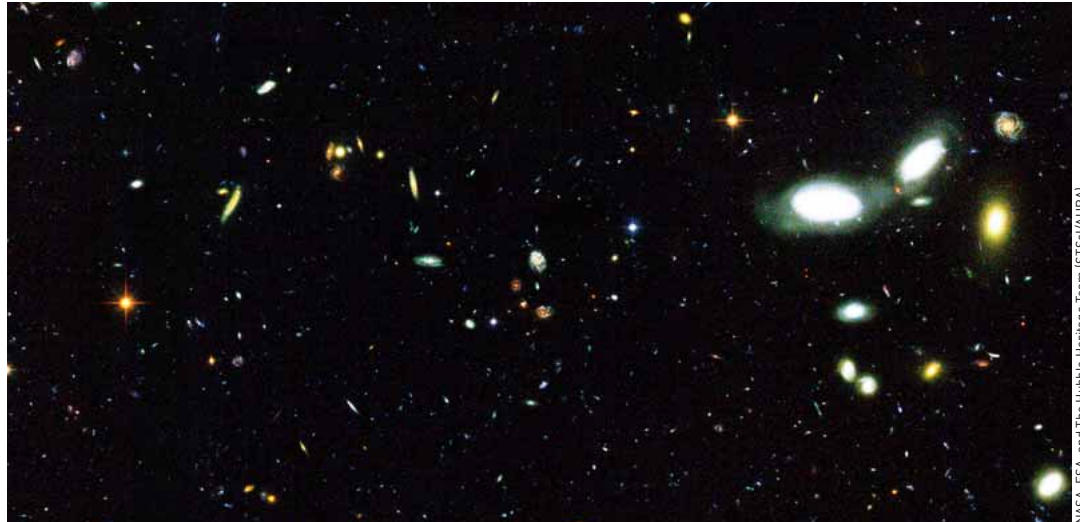


Figure 3. La courbe du haut montre l'intensité de la formation des étoiles dans l'Univers au cours du temps. Elle se mesure en masse d'étoiles (en unité de masses solaires) formée par année dans un volume donné (ici des « boîtes » de 3 millions d'années-lumière de côté). Cette intensité était maximale 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 (ST/ScI/AURA)

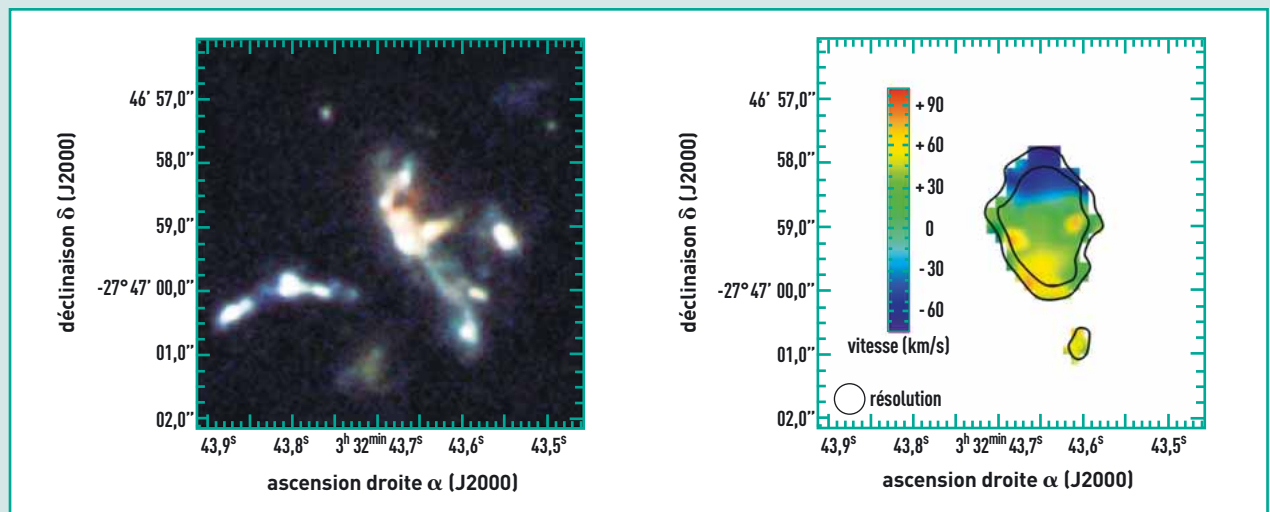
Figure 4. Image profonde du ciel réalisée avec la caméra ACS du satellite spatial Hubble, dans l'hémisphère Sud (région appelée GOODS pour *Great Observatories Origins Deep Surveys*). Couvrant une "surface" apparente équivalente au dixième de celle de la Lune (ou du Soleil), l'image révèle toute une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

La morphogénèse 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/CNRS/ESA/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 génèrent 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



Une galaxie elliptique (NGC 1316).



Une galaxie spirale (NGC 6118).

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.

> **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)

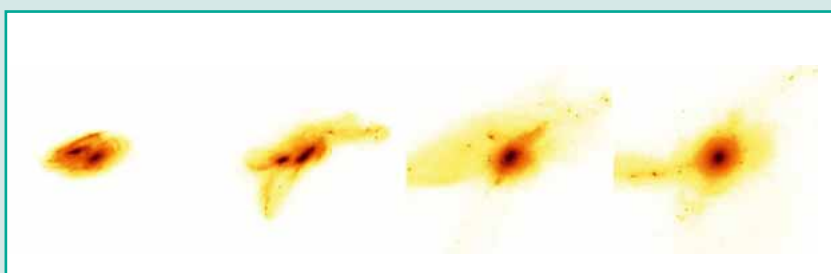


Figure 2. Simulation numérique d'une collision de deux galaxies spirales. Les deux galaxies fusionnent, leurs disques sont détruits, et il en résulte une galaxie de type elliptique.