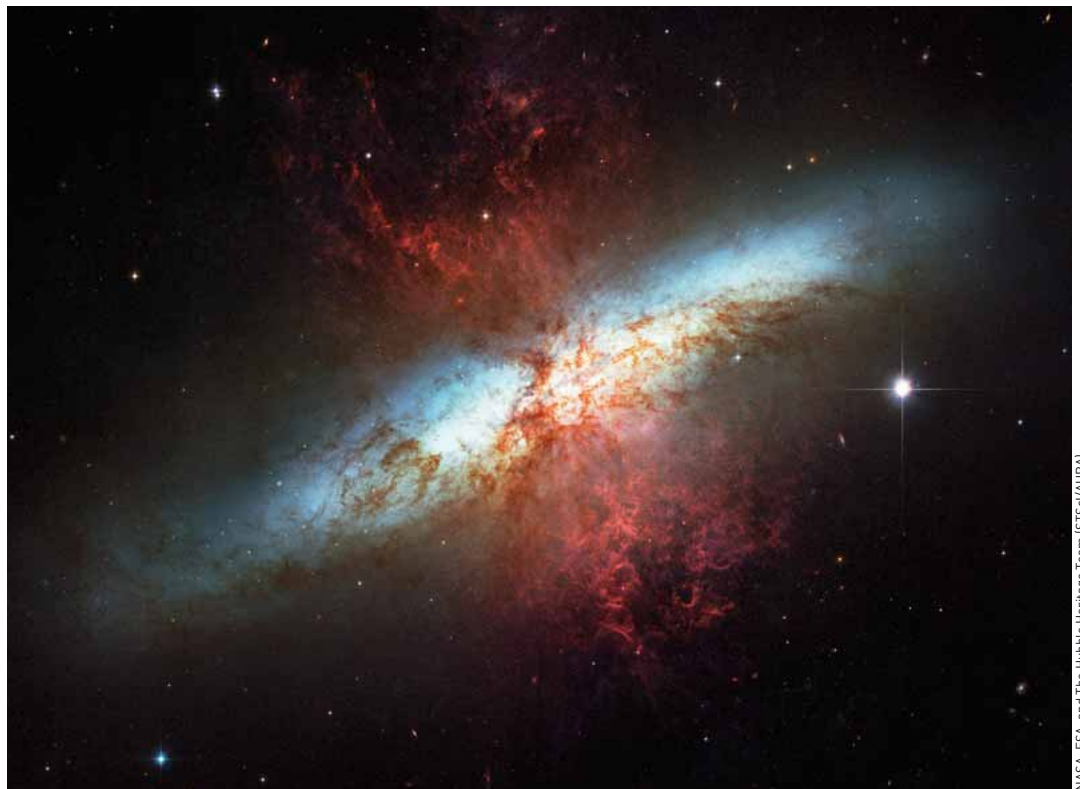




Formation des galaxies : une histoire paradoxale

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.

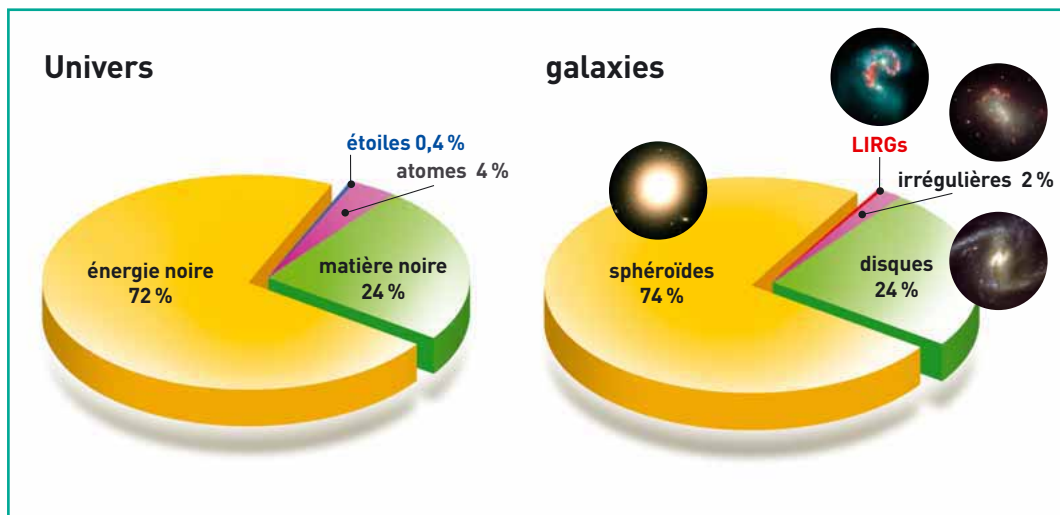


Debra Meloy Etnegreen (Vassar College) et al., NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI)

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.

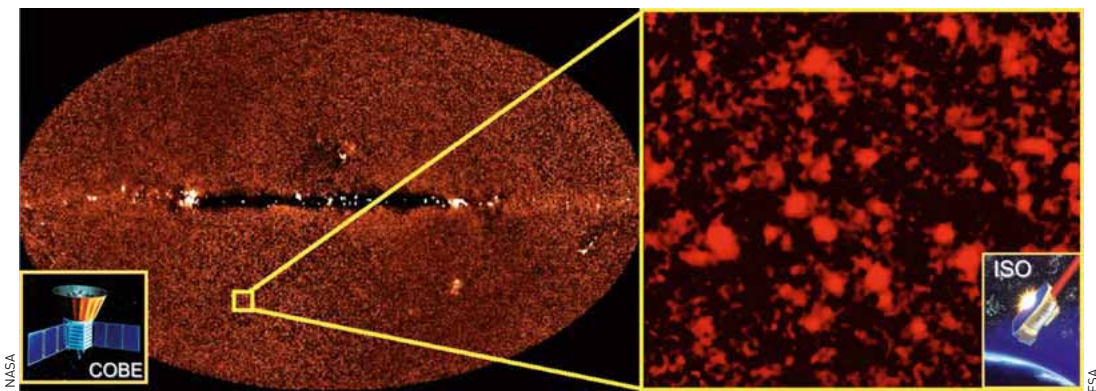


Figure 2. Le fond diffus infrarouge mesuré par le satellite de la NASA COBE (à gauche) et sa résolution en galaxies individuelles par le satellite de l'ESA ISO (à droite).

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

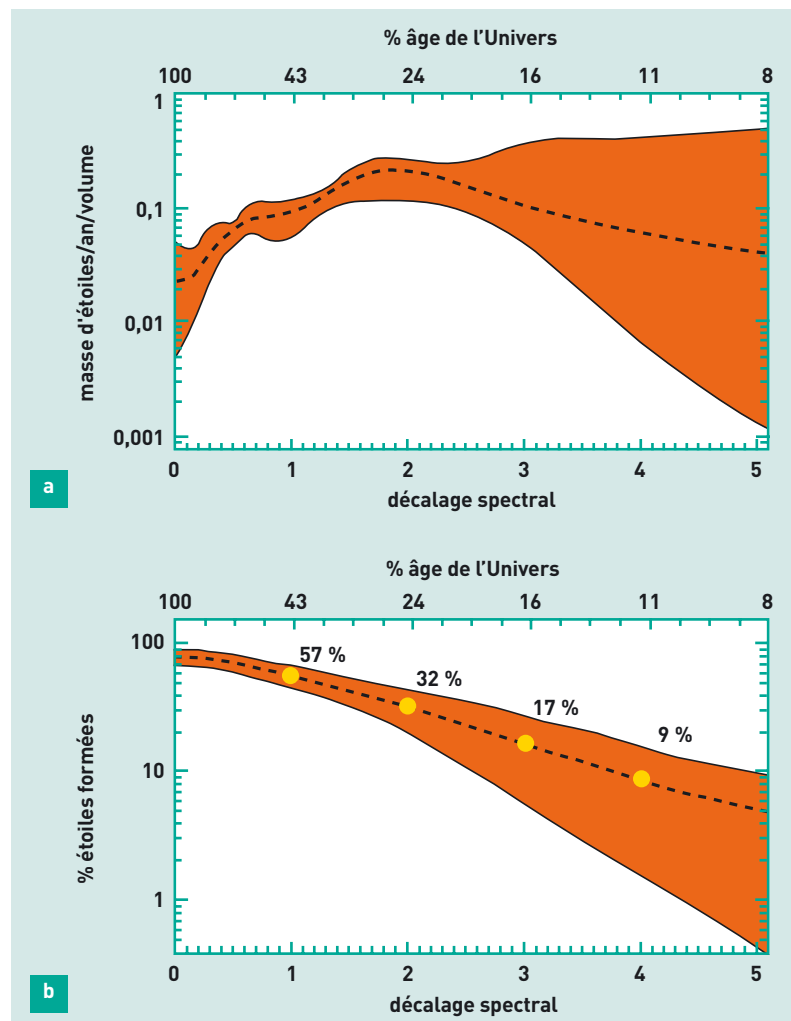
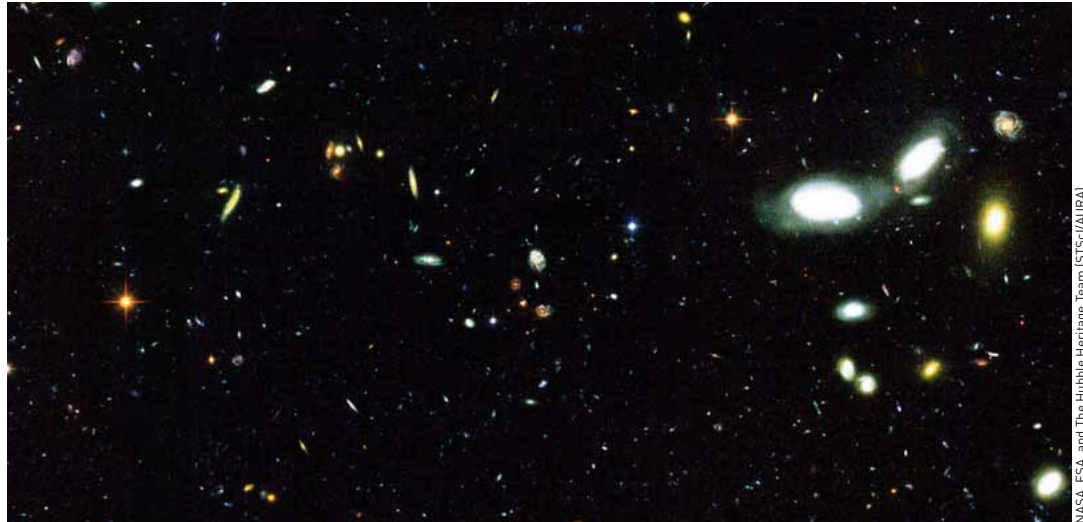


Figure 3. La courbe du haut montre l'intensité de la formation des étoiles dans l'Univers au cours du temps. Elle se mesure en masse d'étoiles (en unité de masses solaires) formée par année dans un volume donné (ici des « boîtes » de 3 millions d'années-lumière de côté). Cette intensité était maximale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

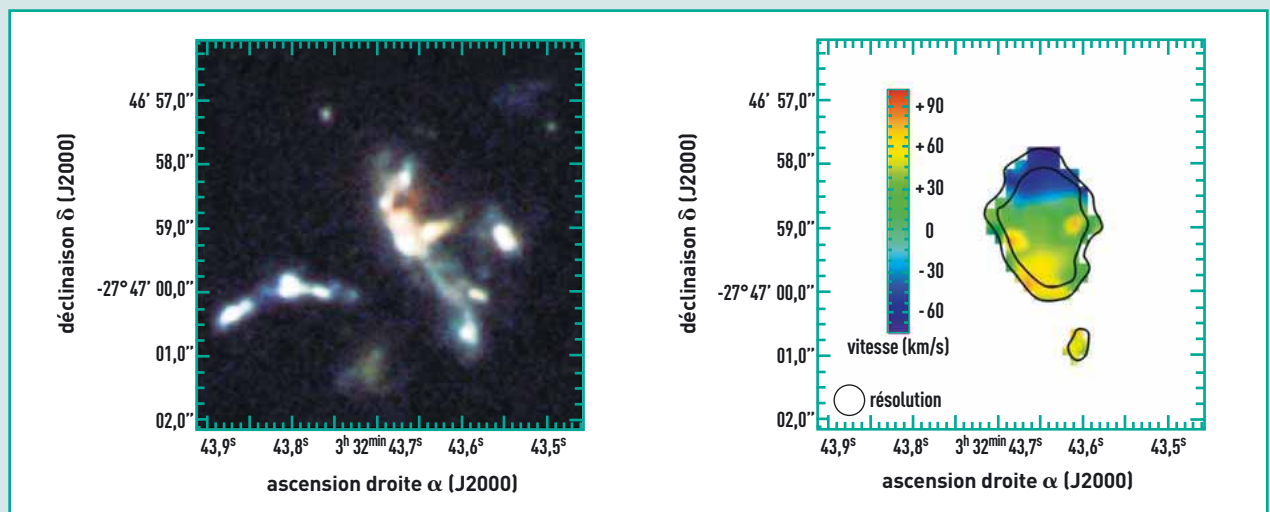
La morphogénèse des galaxies

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 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

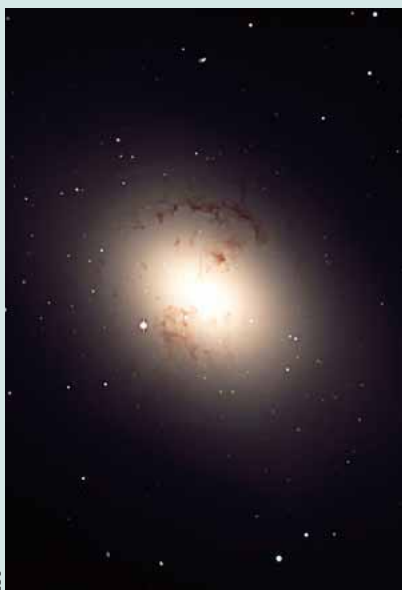
d'abord cru. Si les galaxies aux flambées de formation d'étoiles les plus extrêmes résultent probablement d'épisodes de fusion, la majorité de l'activité des galaxies n'est pas profondément sensible à ces phénomènes. Un autre mécanisme, encore indéterminé, semble jouer le rôle de premier plan. Deux candidats 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



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)

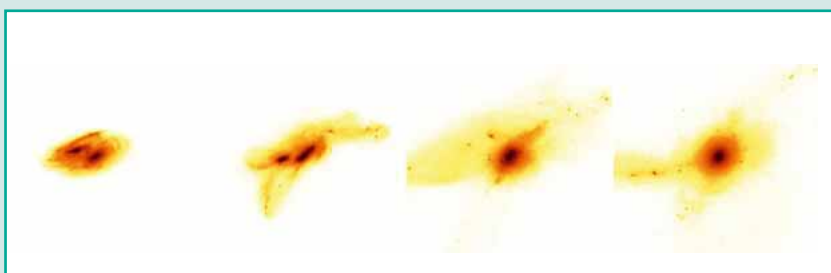


Figure 2. Simulation numérique d'une collision de deux galaxies spirales. Les deux galaxies fusionnent, leurs disques sont détruits, et il en résulte une galaxie de type elliptique.