

lement des secrets de l'histoire de l'Univers primordial, car les matériaux qui les composent ont peu changé depuis le Big Bang.

Quelles sont les causes des flambées stellaires dans les galaxies naines ? Pourquoi les astronomes leur accordent-ils tant d'importance ? Pour répondre à ces questions, examinons les mécanismes de formation des étoiles. Depuis le début de l'Univers, des étoiles se forment. La Voie lactée, cette grande galaxie spirale dont la seule particularité est de contenir le Système solaire, en renferme au moins 100 milliards. La formation stellaire y est lente et régulière ; elle résulte de la contraction de vastes nuages de gaz et de poussières interstellaires. Chaque année, en moyenne, une masse solaire environ de gaz et de poussières se transforme en nouvelles étoiles. En revanche, les sursauts stellaires se déroulent sur une période relativement courte (entre 1 et 20 millions d'années), pendant laquelle les étoiles se forment plus vite que la moyenne, jusqu'à 100 fois plus vite que dans la Voie lactée. Ces périodes sont nécessairement courtes : après quelques centaines de millions d'années de ce régime, la galaxie épuiserait toute sa réserve de gaz.

Les flambées stellaires augmentent considérablement la luminosité des galaxies. Lors de ces brefs épisodes, le rayonnement émane surtout de jeunes étoiles chaudes de 20 masses solaires ou davantage, dont la durée de vie ne dépasse guère quelques millions d'années (plus une étoile est massive, moins longtemps elle vit). Ces étoiles, chacune des dizaines de milliers de fois plus brillantes que le Soleil, chauffent et ionisent les nuages denses de poussières et de gaz à partir desquels elles se forment ; ces nuages absorbent les rayonnements visibles et ultraviolets de l'étoile, puis réémettent cette énergie sous forme de rayonnement radio ou infrarouge, que les astronomes détectent. Parfois, la luminosité des sursauts stellaires atteint presque celle des quasars, les objets les plus lumineux de l'Univers.

Les flambées d'étoiles jouent un rôle crucial dans l'évolution des galaxies. Aussi les astronomes étudient-ils les causes de leur déclenchement, leur déroulement et leur apaisement. Ces questions sont sans doute plus faciles à élucider dans les galaxies naines, qui ne contiennent pas plus

de 100 millions d'étoiles, que dans les grandes galaxies spirales comme la Voie lactée ou Messier 83.

## Un déluge de naines

Comme la plupart des galaxies naines sont très peu lumineuses, les astronomes ne peuvent les étudier que depuis quelques années. Les deux galaxies naines les plus connues sont les deux Nuages de Magellan, le Grand et le Petit, qui nous apparaissent brillants parce qu'ils sont « proches » de notre Galaxie (ils sont à moins de 300 000 années-lumière, visibles dans le ciel austral). Aucune autre galaxie naine n'est visible à l'œil nu, mais, grâce aux nouveaux télescopes, équipés de détecteurs sensibles, nous savons désormais que les galaxies naines sont bien plus nombreuses que les grandes galaxies. Le Groupe local, l'amas de galaxies où se trouve la Voie lactée, ne contient (au dernier recensement) que deux grandes spirales (la Voie lactée et Andromède) pour une quarantaine de galaxies naines. Cette proportion se retrouve probablement pour la majeure partie de l'Univers proche.

Certaines galaxies naines ont une forme elliptique et, parmi celles-ci, les plus petites et les moins brillantes sont nommées naines sphéroïdales. Cependant, la plupart des galaxies naines n'ont pas de structure ou de forme

simple. Les observateurs leur ont attribué des surnoms. On parle de « grosses gouttes » ou d'« œufs au plat », ce qui donne une idée de leur apparence typique ; la nomenclature officielle est « galaxies naines irrégulières ».

Les galaxies naines ne sont pas des grandes galaxies en miniature : elles évoluent par des mécanismes différents. Ainsi, les grandes galaxies spirales contiennent des nuages géants d'hydrogène moléculaire ( $H_2$ ), d'hélium et de poussières qui se contractent lentement et forment des étoiles. Les bras spiraux résultent d'ondes de densité, les étoiles se trouvant dans le creux de l'onde. Le passage de ces ondes déclenche la formation d'étoiles en comprimant les nuages moléculaires qu'elles traversent. Les galaxies spirales ne sont ainsi jamais complètement au repos : des étoiles y naissent en permanence.

À l'inverse, les galaxies naines contiennent peu d'hydrogène moléculaire, mais beaucoup d'hydrogène atomique, c'est-à-dire des atomes d'hydrogène libres, non appariés. La masse des nuages d'hydrogène atomique y est dix fois supérieure à celle des étoiles. Toutefois, leur densité est inférieure à celle des nuages d'hydrogène moléculaire : la contraction sous l'action des forces de gravitation est plus lente, et les étoiles se forment plus rarement. De surcroît, aucune onde de densité ni aucun déplacement organisé de gaz ne



**2. LES GALAXIES NAINES À SURSAUTS, telle NGC 4214 (a), contiennent des concentrations de jeunes étoiles bleues, entourées de nuages de gaz ionisés rougeoyants. Des flambées d'étoiles sont également visibles dans la galaxie naine NGC 2366 (b) ; un gros plan pris par le télescope spatial Hubble montre un amas dense d'étoiles massives enfouies**

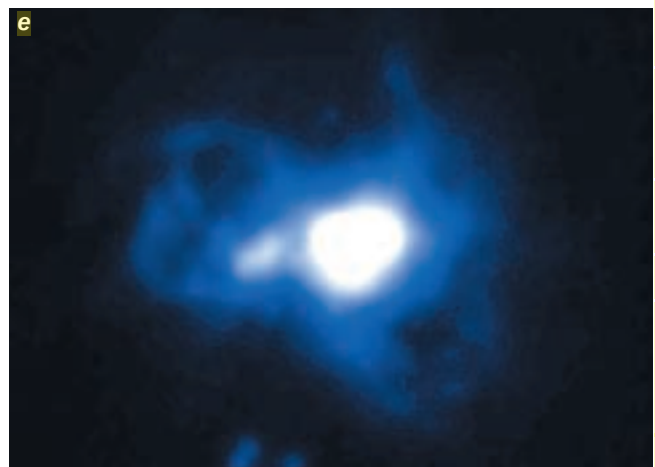
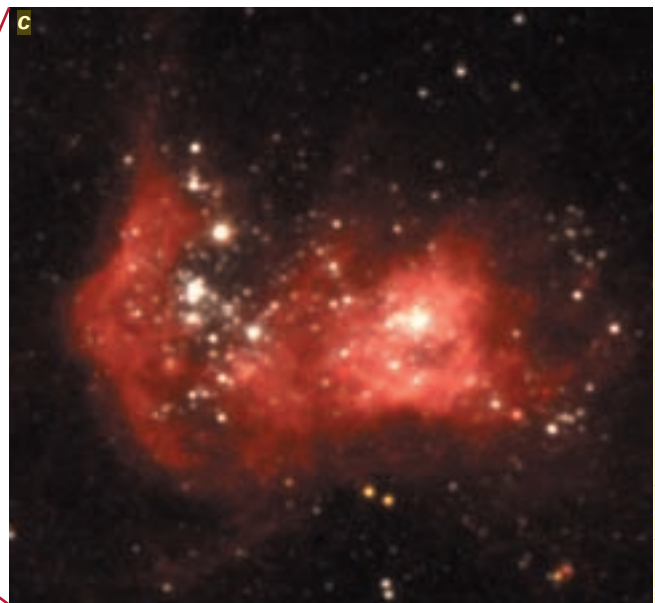
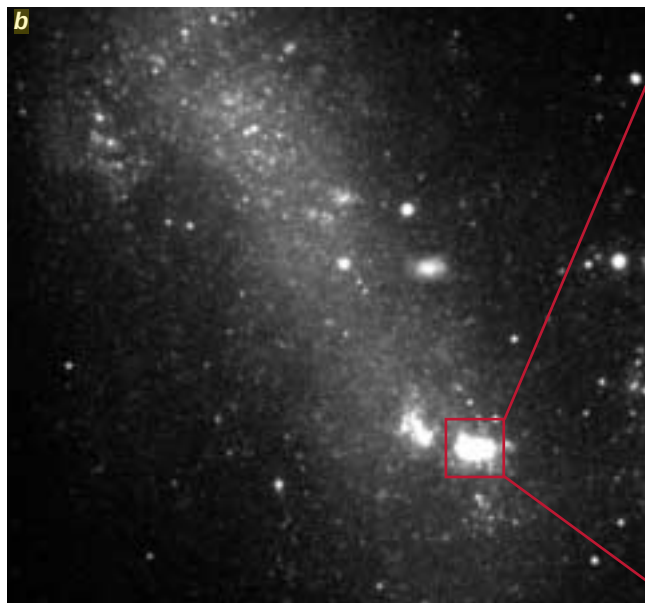
déclenchent l'effondrement des nuages. Les naines restent calmes l'essentiel de leur existence : durant ces périodes, les astres qui meurent ne sont pas remplacés, et seules subsistent des étoiles relativement vieilles, rouges et faiblement lumineuses. Seules les galaxies naines où flambent les étoiles abritent des étoiles lumineuses, chaudes et bleues, récemment formées.

Les astronomes n'observent évidemment pas l'évolution des galaxies naines : ils en voient certaines qui sont actives et d'autres qui sont calmes. En revanche, l'étude de la composition chimique des galaxies naines montre que chaque galaxie naine passe successivement par ces deux états. La formation d'étoiles modifie la composition des galaxies : lorsque les étoiles massives arrivent en fin de vie, elles explo-

sent violemment, dispersent dans le gaz galactique environnant les éléments lourds formés en leur sein, au cours de leur vie, par les réactions nucléaires. À l'inverse, quand aucune étoile ne naît au sein de la galaxie, la composition chimique de cette dernière n'évolue pas. Ainsi, dans une galaxie, la proportion d'éléments plus lourds que l'hydrogène (ce que les astronomes nomment improprement «métaux») révèle l'histoire de celle-ci. Plus la proportion d'hydrogène est élevée, moins la galaxie est évoluée.

Or, dans les galaxies naines, la proportion d'éléments plus lourds que l'hydrogène est comprise entre 2 et 30 pour cent de sa valeur au voisinage du Soleil (la moyenne est de dix pour cent). Seules un petit nombre de galaxies naines à sursauts très actifs

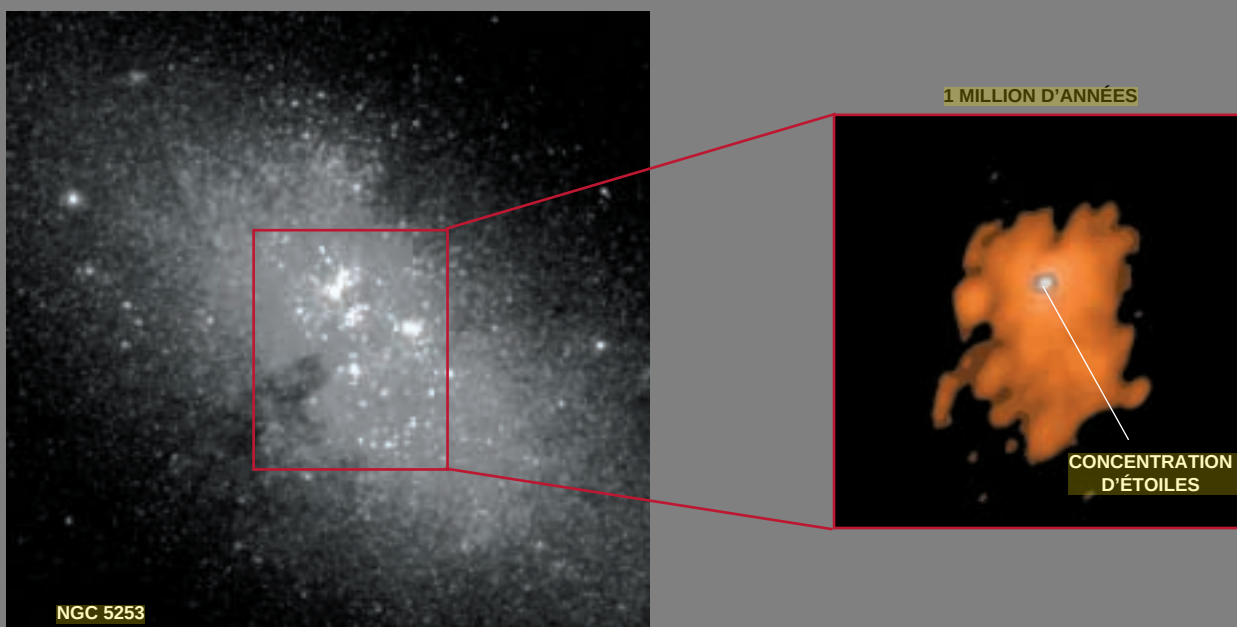
ont une proportion en éléments lourds comparable à celle des galaxies spirales. Comme la plupart des galaxies naines ont peu évolué, les astronomes espèrent en trouver une qui soit véritablement primordiale, c'est-à-dire inchangée depuis le Big Bang. Parmi les galaxies naines connues, les deux qui ont la plus faible proportion en éléments lourds sont I Zwicky 18 et SBS 0335-052. Toutefois, même celles-ci ne paraissent pas primordiales, et plusieurs épisodes de formation stellaire semblent s'y être déroulés (on y a détecté des populations stellaires d'âges distincts). En attendant la découverte d'une galaxie vraiment primordiale, les cosmologistes étudient les galaxies naines pour tenter de comprendre comment sont nées les premières générations d'étoiles.



dans un nuage de gaz (c). Le sursaut d'étoiles dans la galaxie naine Zwicky 0855+06 (d) résulte apparemment d'une rencontre proche avec une autre galaxie naine, qui aurait également formé le pont d'étoiles qui les relie. La galaxie naine à sursauts Henize 2-10 (e) a

un filament de gaz qui indique l'assimilation ancienne d'une galaxie plus petite. Henize 2-10 possède aussi des coquilles constituées de gaz rejeté par les jeunes étoiles massives qui faisaient partie de sursauts stellaires.

MAS/Space Telescope Science Institute (NGC 4214 et NGC 2366 close-up, CHT (NGC 2366), David Méndez et César Esteban Instituto de Astrofísica de Canarias (Zw 0855+06 et Henize2-10)



**3. LE SURSAUT STELLAIRE**, au centre de la galaxie NGC 5253 (ci-dessus, à gauche), s'est apparemment déclenché quand la galaxie a absorbé un nuage de gaz intergalactique. La région la plus jeune

du sursaut, âgée de moins d'un million d'années, n'est visible que sur les images radio et infrarouges (ci-dessus, à droite), car ses étoiles sont encore enfouies dans la nébuleuse où elles se sont formées.

## Feu d'artifice stellaire

Les flambées d'étoiles donnent aux galaxies naines une apparence caractéristique : elles contiennent alors des concentrations de jeunes étoiles, bleues et chaudes, taches brillantes plus ou moins structurées, entourées d'une enveloppe moins brillante d'étoiles rouges et froides, plus âgées. Au cours des sursauts stellaires importants, la luminosité des galaxies naines augmente au point d'égaliser celle des grandes galaxies spirales (au repos, la luminosité n'est que de un pour cent de cette valeur). Cette activité stellaire est concentrée dans une petite zone, de diamètre compris entre quelques centaines et un millier d'années-lumière (les galaxies naines ont généralement un diamètre inférieur à 6000 années-lumière). Chaque concentration contient des centaines d'étoiles brillantes, parfois des dizaines de milliers. Au cours d'un épisode de sursaut stellaire, plusieurs zones actives peuvent coexister ; elles sont rarement au centre de la galaxie.

Contrairement à la Voie lactée et aux autres grandes galaxies, tous les âges d'étoiles ne sont pas représentés dans les galaxies naines à sursauts : celles-ci ne contiennent en général que des concentrations de très jeunes étoiles et une enveloppe constituée d'étoiles plus âgées de quelques milliards d'années. Les astronomes esti-

ment l'âge des populations stellaires dans ces galaxies en cherchant des phases caractéristiques de l'évolution stellaire. L'identification d'une phase de Wolf-Rayet, que seules les étoiles très massives (plus de 25 masses solaires) atteignent quand elles ont entre deux et dix millions d'années, est sans doute l'un des moyens diagnostiques les plus efficaces. Durant cette phase de leur développement, les étoiles éjectent la plus grande partie de leur masse initiale à des vitesses de quelques milliers de kilomètres par seconde. Cet état s'observe d'après les longueurs d'onde des rayonnements émis par des ions éjectés : l'effet Doppler (l'effet qui fait paraître plus aigu le son d'une ambulance qui approche, et plus grave le son quand le véhicule s'éloigne) élargit les raies observées ; au lieu d'apparaître sur le spectre comme de fines bandes, elles s'étalent vers le rouge et vers le bleu. Lorsque les astronomes repèrent un tel élargissement dans le spectre émanant d'une flambée d'étoiles, ils savent que cette zone contient des étoiles de Wolf-Rayet en grand nombre et que la population stellaire de cette zone ne peut avoir plus de dix millions d'années.

Dans les grandes galaxies, les régions de sursauts se superposent souvent au noyau galactique brillant ou à un bras spiral de la galaxie, ce qui rend leur observation plus difficile. De surcroît, le rayonnement engendré par

l'activité régulière de la galaxie se distingue difficilement des émissions propres aux flambées stellaires. Ce problème est particulièrement gênant dans la bande radio du spectre. Nous l'avons vu, les jeunes étoiles massives formées dans des concentrations ionisent les nuages de gaz environnants. Ces nuages engendrent alors des émissions radio avec un spectre thermique (l'intensité des émissions varie en fonction de la fréquence de manière caractéristique). Lorsque les étoiles massives finissant par s'effondrer forment des supernovae, les vestiges de l'explosion émettent des ondes radio avec un spectre non thermique. Le spectre radio d'une grande galaxie est donc une combinaison du rayonnement thermique de la plus jeune génération d'étoiles massives et du rayonnement non thermique des générations passées. Toutefois, le rayonnement non thermique est souvent plus intense et plus durable que le rayonnement thermique. Ainsi, dans une grande galaxie, les émissions caractéristiques des sursauts stellaires sont souvent masquées par les autres émissions.

À l'inverse, les galaxies naines ne sont pas le siège de cette formation permanente d'étoiles, et les régions de formation stellaire se repèrent aisément. Pour les galaxies naines à sursauts NGC 5253 et II Zwicky 40, par exemple, on ne voit que les émissions thermiques des étoiles jeunes, car la contribution