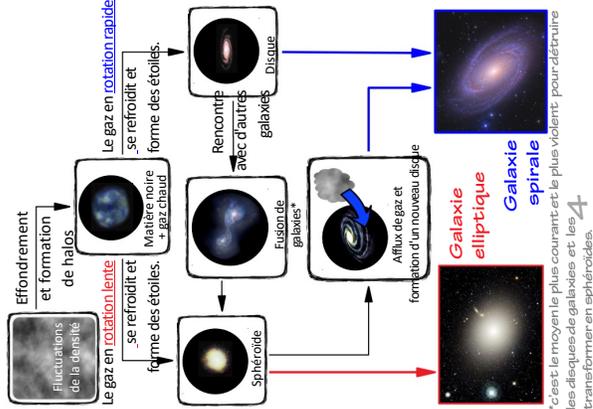


De minuscules fluctuations de densité

Une théorie de la formation et de l'évolution des galaxies doit expliquer quels sont les processus physiques en jeu pour former les différents types de galaxies et quand et comment ils interviennent. Nous savons que la séquence de Hubble* n'est pas une séquence évolutive. Le diagramme de la page ci-contre illustre les voies qui peuvent mener à la formation des galaxies elliptiques et spirales. Tout commence par de minuscules **fluctuations de densité** dans l'Univers très jeune. Au fur et à mesure de l'expansion de l'Univers**, l'amplitude de ces fluctuations augmente. Finalement, la **gravité** l'emporte et les halos de matière noire s'effondrent. Le gaz chaud attiré par ces halos se refroidit, formant des étoiles. La galaxie formée est elliptique ou spirale suivant l'importance de la rotation, la quantité de gaz dans le halo et le fait qu'il y ait eu ou non de fusions avec d'autres galaxies.

5 *Voir TUMIP 3
** Voir TUMIP 12



Galaxies dans les simulations

Galaxies observées (Sloan Digital Sky Survey)

Comparaison entre des observations de galaxies réelles et des images de galaxies simulées avec les superordinateurs du projet Illustris-TNG. Ci-dessous : différents types morphologiques. Ci-dessous : évolution d'une galaxie simulée comparée à des galaxies observées d'âge similaire.

Galaxies observées (Télescope Spatial de Hubble)

Évolution d'une galaxie simulée

12 11 10 8 aujourd'hui
Il y a des milliards d'années

Créer des galaxies

Les **simulations cosmologiques** réalisées sur des superordinateurs nous ont aidé à comprendre comment les galaxies se sont formées et ont évolué. Les images de la page ci-contre montrent les résultats d'une des plus grandes simulations jamais réalisées à ce jour. Ces simulations décrivent plus de 13 milliards d'années d'évolution cosmique d'un volume contenant des dizaines de milliers de galaxies. Elles incluent le gaz, les étoiles, la matière noire, l'énergie noire et des processus physiques tels que l'évolution stellaire, l'enrichissement chimique et les mécanismes de rétroaction. Malgré leur immense complexité, on peut constater que les simulations reproduisent vraiment bien les propriétés des galaxies réelles ! Ces simulations sont tellement complexes que, si on pouvait les exécuter sur un ordinateur ordinaire, il faudrait des centaines, voire des milliers d'années pour les mener à bien !

13

Transformer le gaz en étoiles

Tant que la galaxie contient du gaz et que celui-ci peut se refroidir, des étoiles peuvent se former. Cependant, les explosions de supernovae libèrent de l'énergie qui peut chauffer et électer le gaz d'une galaxie. Si la galaxie est petite, la gravité est trop faible pour empêcher le gaz de s'échapper, et ce processus de **rétroaction par les supernovae** supprime la formation d'étoiles. Dans les galaxies plus massives, la **rétroaction due aux noyaux actifs de galaxies*** (NAG) a un impact important sur le cycle de formation des étoiles. Dans un NAG le trou noir central (des millions ou des milliards de fois plus massif que le Soleil) engoulotit de la matière et libère une énorme quantité d'énergie qui réchauffe le gaz environnant. Les études montrent que les propriétés des galaxies dépendent de la masse de leur trou noir central, indiquant que la rétroaction due à ces monstres joue un rôle fondamental dans l'évolution des galaxies.

9 * Voir TUMIP 6

Quiz

Peux-tu identifier lesquelles de ces images ont été créées à partir de simulations et lesquelles à partir d'observations réelles ?

Réponses au verso

L'Univers dans ma poche

Agache: Illustration du cycle de formation du gaz et des étoiles. Le gaz chaud se refroidit et se condense en gaz froid. Le gaz froid se refroidit et se condense en étoiles. Le gaz chaud se refroidit et se condense en gaz froid. Le gaz froid se refroidit et se condense en étoiles. Le gaz chaud se refroidit et se condense en gaz froid. Le gaz froid se refroidit et se condense en étoiles.

Figure de droite: Les galaxies peuvent éjecter du gaz de leur environnement. Cependant, des mécanismes de rétroaction peuvent chauffer le gaz autour de la galaxie, empêchant l'afflux de gaz, ou même éjecter le gaz interne. La figure ci-dessous montre ces mécanismes en action. À gauche: explosion de supernovae provoquant des éjections de gaz par l'énergie et chauffage du gaz par l'énergie. À droite: éjection de gaz par l'énergie libérée par le NAG.

16 000 années-lumière

Un million d'années-lumière

980 000 années-lumière

Naissance et vie des galaxies

Marina Trevisan
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brésil

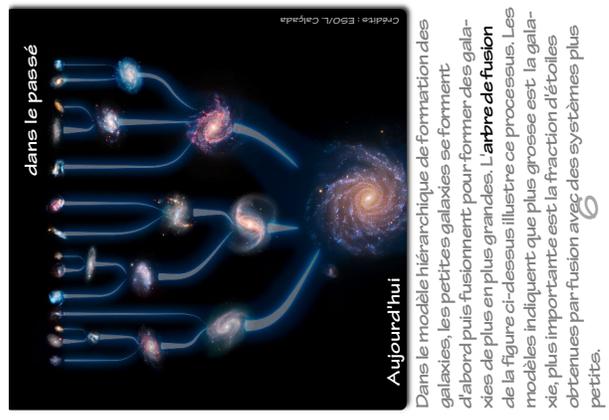
TUMIP No. 23 THE UNIVERSE IN MY POCKET

Un univers de galaxies

En 1924, Edwin Hubble montra que les nébuleuses spirales étaient, en fait, des galaxies similaires à notre Voie lactée*. Une trentaine d'années se sont écoulées avant que n'apparaissent les premiers modèles expliquant la formation de ces objets. Nos connaissances sur ce sujet sont donc très récentes.

La théorie actuelle de la formation et de l'évolution des galaxies est construite dans le cadre du modèle cosmologique standard. Dans ce contexte, l'Univers contient trois composants principaux: environ 26% de matière noire froide, 70% d'énergie noire et seulement 4% de matière baryonique (la matière normale que nous connaissons). La proportion entre ces composants détermine la façon dont les structures de l'Univers se forment et évoluent. Cependant, jusqu'à présent, nous ne savons pas ce que sont ces composants sombres.

3 *Voir TUMIP 3



L'Univers dans ma poche n° 23

Ce mini-livre a été écrit en 2021 par Marina Trevisan de l'Université Fédérale du Rio Grande do Sul (UFRRGS, Brésil) et révisé par Allan Schnorr Müller (UFRRGS, Brésil) et Gary Mamon (Institut d'Astrophysique de Paris, France).

Image de couverture : une galaxie spirale aujourd'hui, il y a 4 milliards et 11 milliards d'années. Crédit : NASA, ESA.

Pour en savoir plus sur cette série et sur les sujets présentés dans ce mini-livre, tu peux consulter le site <http://www.tuinip.org.br>

Traduction: Crazy'na Sraahelika
TUMIP Creative Commons

Observer le passé

La lumière voyage à la vitesse de 300.000 kilomètres par seconde, ce qui est une valeur élevée, mais finie. En conséquence, nous ne pouvons pas observer ce qui se passe maintenant. Il y a 13 milliards d'années ! Autrement dit, elles étaient plus irrégulières, contenaient plus de gaz et formaient des étoiles à un rythme bien plus élevé qu'aujourd'hui. Le **télescope spatial de Hubble** a produit des images extrêmement nettes de galaxies, nous permettant de découvrir de nombreux aspects de l'évolution des premières galaxies. Le prochain **télescope spatial de James Webb** sera en mesure d'obtenir des images aussi nettes de galaxies à des distances beaucoup plus grandes, ce qui nous permettra d'observer les toutes premières galaxies !

Réponse

Les images provenant de simulations sont du projet Illustris; les observations sont du Sloan Digital Sky Survey.

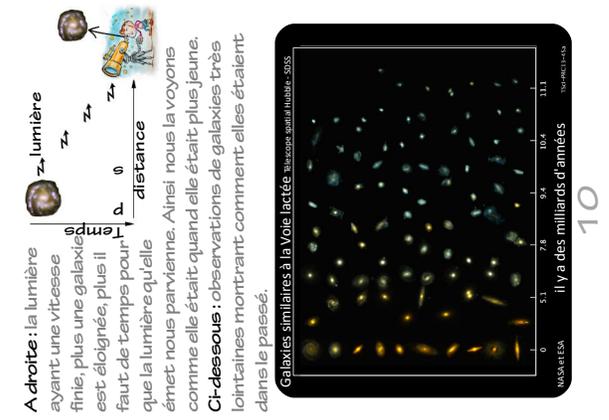
Il est bien difficile de les distinguer les unes des autres, tu ne trouves pas ?

Simulation

Observation

Simulation

Observation



Un Univers hiérarchique

Dans le modèle cosmologique qui décrit notre Univers, les fluctuations de densité initiales ont des amplitudes d'autant plus fortes que leurs échelles sont petites. Ceci implique que les petites halos de matière noire naissent en premier et fusionnent, formant des halos de plus en plus grands. Le schéma de **l'arbre de fusion** (voir ci-contre) dépeint l'histoire de la formation des halos de matière noire. Comme les petites galaxies se trouvent dans des halos plus petits, la formation des galaxies est **hiérarchique**. Les observations montrent que les petites galaxies fabriquent leurs étoiles plus tard que les galaxies massives. Ceci vient du fait que ces dernières atteignent une masse critique plus tôt, empêchant la formation d'autres étoiles. Les petites galaxies peuvent former des étoiles pendant un temps plus long et leurs populations stellaires sont plus jeunes.

Dans le modèle proposé par Olin Eggen, Donald Lynden-Bell et Allan Sandage en 1962, les galaxies se sont formées à partir de **l'effondrement d'un nuage de gaz géant** : il y a environ 10 milliards d'années. Les flèches de la figure indiquent la direction du mouvement du gaz. Aujourd'hui, on sait que le processus de formation des galaxies est beaucoup plus complexe que ce que suggère ce modèle.

En 1933, Fritz Zwicky mesura les vitesses des galaxies dans un amas de grande masse, et la forte disparition des vitesses l'amena à conclure que la masse de l'amas est dominée par de la **matière noire invisible**. En 1998, deux équipes de chercheurs découvrirent que l'Univers est en expansion à un rythme accéléré. Comme on ne connaît pas la nature de l'énergie qui provoque cette accélération, on la appelle **énergie noire**.

2