

12 LES GALAXIES

Combien y a-t-il de galaxies visibles à partir de la Terre ?



www.cieletespacephotos.fr/main.php/v/Univers/AmasGalaxies/021-00400-07high.jpg.html

Découvrez la réponse à cette question dans ce chapitre.

12.1 LA VOIE LACTÉE

Par une nuit très sombre, on remarque qu'il y a une bande lumineuse qui traverse le ciel. On peut voir cette bande lumineuse sur cette photo.

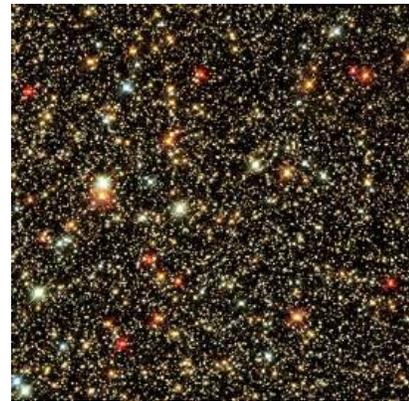
Selon la mythologie grecque, cette bande lumineuse serait une trainée de lait provenant d'une des tétines de la déesse Héra. On lui donna donc le nom de *Voie lactée*.

Plus sérieusement, certains, comme Démocrite et Anaxagore (tous deux vivants au 5^e siècle av. J.-C.), pensent que cette lueur provient de multiples étoiles trop petites pour être vues distinctement. Aristote pense plutôt que cette lueur provient d'un « météore atmosphérique » se trouvant plus près de la Terre que la Lune. Ces deux théories s'affrontent jusqu'au 16^e siècle et c'est généralement la théorie d'Aristote qui domine.

À partir du moment où Galilée a observé la Voie lactée au télescope, on ne pouvait plus douter que la luminosité de cette bande provient effectivement de nombreuses étoiles. Voici une image des étoiles qui forment la Voie lactée faite par Hubble. C'est une partie de la Voie lactée située dans la constellation du Sagittaire.



Stephan Gaumont-Guay. Photo prise au parc du Gros-Morne, Terre-Neuve

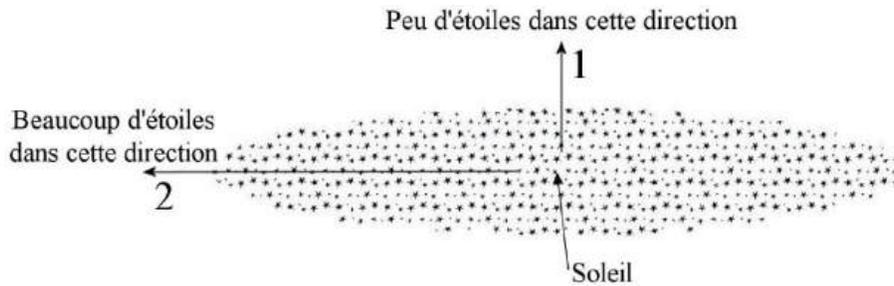


www.astrographics.com/GalleryPrintsIndex/GP0028.html

12.2 LE MODÈLE DE KAPTEYN

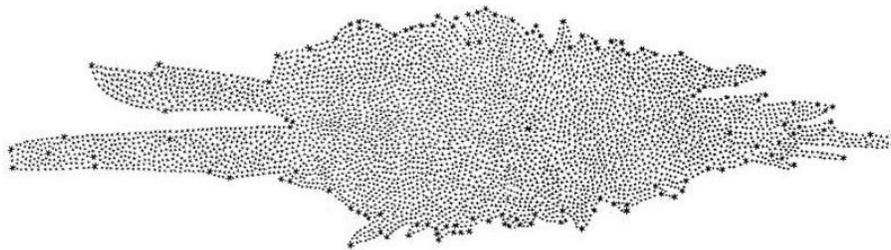
Pourquoi ces étoiles forment-elles une bande qui entoure la Terre dans le ciel ?

En 1740, Thomas Wright propose une solution à ce problème. Il suggère que toutes les étoiles sont distribuées de façon à former une sphère aplatie (donc un ellipsoïde) et que le Soleil n'est pas loin du centre de cette structure. (En fait, ce n'est pas exactement le modèle proposé par Wright, mais la différence entre son modèle et celui présenté ici n'est pas importante pour notre explication.)



Avec une telle distribution d'étoiles, on voit peu d'étoiles quand on regarde dans la direction où l'ellipsoïde est le plus petit (direction 1 sur la figure). Cependant, on voit beaucoup d'étoiles quand on regarde dans la direction où l'ellipsoïde est le plus grand (direction 2 sur la figure). On voit donc beaucoup d'étoiles dans toutes les directions qui sont perpendiculaires à la direction 1 et on observe donc une bande qui entoure la Terre où il y a beaucoup d'étoiles. Cette structure d'étoile a alors pris à son tour le nom de Voie lactée. On a aussi appelé ce regroupement d'étoiles *galaxie*.

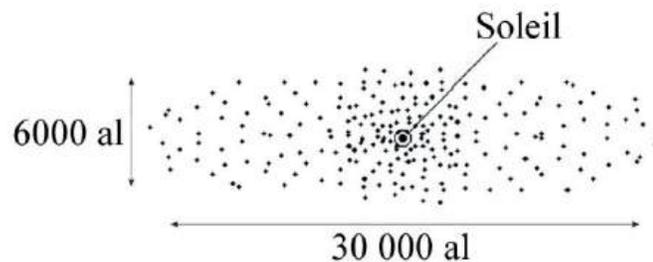
Pendant les années 1780, William Herschell raffine un peu le modèle de Wright. Il suppose simplement que si on voit plus d'étoiles dans une direction, cela signifie que la Voie lactée est plus grande dans cette direction. Il obtient alors le modèle suivant.



www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast162/Unit4/milkyway.html

Le petit point noir à peu près au centre est le Soleil.

À partir de 1838, on commence à avoir une meilleure idée de la distribution des étoiles parce qu'on peut calculer la distance de quelques étoiles avec la parallaxe. Finalement, on arrive au modèle de Kapteyn, développé par Jacobus Kapteyn entre 1906 et 1922. L'image montre ce à quoi il était arrivé en 1922.



casswww.ucsd.edu/archive/physics/ph162/lect1.html

Dans ce modèle, les étoiles ne sont pas distribuées uniformément. La densité diminue rapidement à mesure qu'on s'éloigne du centre de la Voie lactée. À 3000 al du centre, la densité est déjà à seulement 40 % de ce qu'elle était au centre. Elle diminue à 4 % de la valeur centrale à 15 000 al du centre dans la direction où la Voie lactée est la plus grande et à 3000 al du centre dans la direction où la Voie lactée est la plus petite. Il n'y a donc pas de dimensions précises pour la Voie lactée, mais plutôt une densité qui diminue

graduellement. C'est pour ça que, d'une source à l'autre, on voit de grandes variations pour les dimensions du modèle de Kapteyn. Les dimensions indiquées sur la figure sont celles où la densité diminue à seulement 4 % de la valeur centrale. Remarquez aussi que les distances étaient très approximatives à cette époque, car très peu de parallaxes avaient été mesurées.

Le Soleil était presque au centre de la galaxie dans le modèle de Kapteyn. Il était à 160 al au-dessus du milieu et 2100 al à côté du centre (disons à gauche du centre sur la figure).

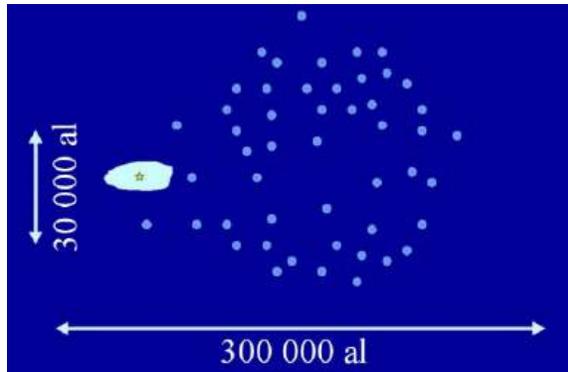
12.3 UNE GALAXIE BEAUCOUP PLUS GRANDE

Entre 1915 et 1919, Harlow Shapley détermine la distribution des amas globulaires autour de nous. Les amas globulaires sont des amas d'étoiles contenant plusieurs milliers, voire des millions d'étoiles. Le plus célèbre, qui est visible à l'œil nu, est l'amas d'Hercule (à droite), situé, bien entendu, dans la constellation d'Hercule.



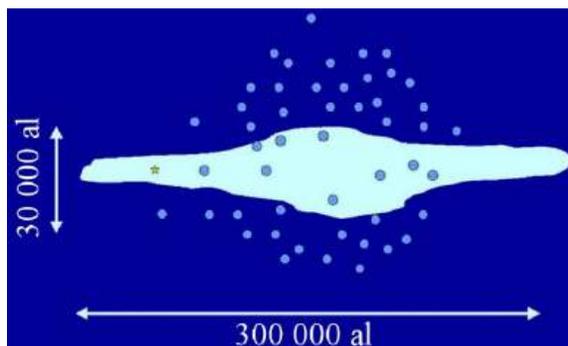
apod.nasa.gov/apod/ap100527.html

Avec une telle quantité d'étoiles dans l'amas, il y a de bonnes chances qu'on puisse trouver une étoile variable de type céphéide ou RR de la Lyre, ce qui permet de trouver la distance de l'amas. Shapley trouva ainsi la distance de 93 amas pour obtenir la distribution de ces amas autour de nous. L'image montre ce qu'il obtint. L'étoile en jaune est le Soleil et la zone en bleu pâle est la Voie lactée selon le modèle de Kapteyn (dont les limites sont approximativement celles où la densité d'étoiles est 2,5 % de la densité au centre).



eee.uci.edu/clients/bjbecker/ExploringtheCosmos/lecture17.html

Shapley est troublé par le fait que les amas globulaires ne sont pas distribués symétriquement autour de la galaxie. Cela lui semble tellement illogique qu'il propose que la galaxie est beaucoup plus grande que ce qu'on peut observer, de sorte que les amas globulaires soient distribués symétriquement autour du centre de la galaxie. L'image droite montre la véritable étendue de la Voie lactée selon Shapley.



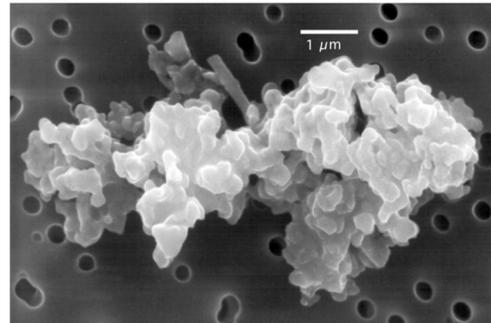
Cependant, si la galaxie est si grande que ça, comment se fait-il qu'on ne puisse pas la voir au complet à partir de la Terre ?

12.4 LA POUSSIÈRE

C'est la poussière qui nous empêche de voir toutes les étoiles de la Voie lactée. La poussière est une composante de la matière interstellaire.

Nature de la poussière

La poussière ne constitue que 0,1 % de la matière interstellaire. Le diamètre des grains de poussière varie généralement entre 0,1 μm et 10 μm , ce qui correspond environ à la taille des particules dans la fumée de cigarette. Ces grains de poussière peuvent être constitués de roche, de carbone, de glace ou de fer.



en.wikipedia.org/wiki/File:Porous_chondriteIDP.jpg

Atténuation de la lumière par la poussière

Le principal effet de cette poussière est d'atténuer la lumière qui nous arrive des étoiles. L'effet est particulièrement frappant quand la poussière devient relativement concentrée comme dans un nuage moléculaire.

On peut très bien voir sur cette image que la traînée de poussière bloque la lumière des étoiles derrière cette poussière. (Il s'agit d'une partie d'un nuage de moléculaire, appelée *la rivière noire* qui n'est pas très loin de l'étoile Antarès dans la constellation du Taureau.)



www.astronoo.com/en/articles/clouds-of-dust.html

La poussière est présente partout dans la Voie lactée, pas seulement dans les nuages moléculaires. Évidemment, elle est moins concentrée à l'extérieur des nuages, mais il y en a suffisamment pour causer une atténuation de la lumière des étoiles.

Les calculs montrent que les étoiles les plus brillantes deviennent pratiquement invisibles à l'œil nu si elles sont à une distance supérieure à 26 000 al quand il n'y a pas de poussière.

Avec la poussière, elles deviennent pratiquement invisibles à l'œil nu à une distance supérieure à seulement 8200 al. Cela revient à dire qu'avec la poussière, on ne voit pas beaucoup de choses qui sont à plus de 8000 al de nous dans la Voie lactée.

N'oubliez pas que cette atténuation se fait uniquement là où il y a de la poussière, donc dans la Voie lactée. On ne voit pas très loin uniquement quand on regarde dans la direction de la Voie lactée. On peut voir beaucoup plus loin dans les autres directions, car il n'y a pas beaucoup de poussière dans ces directions (figure).

N'oubliez pas non plus que la poussière n'est pas distribuée uniformément dans la galaxie. La densité de poussière peut devenir très grande dans des nuages moléculaires et provoquer une atténuation beaucoup plus grande qu'en moyenne. À l'autre extrême, il y a des régions où il y a très peu de poussière et dans lesquelles la lumière sera très peu atténuée.



www.space.com/2625-space-dust-pervasive-thought.html

Comment la présence de poussière explique-t-elle qu'on ne voit qu'une partie de la Voie lactée ?

Pour comprendre comment la poussière limite ce qu'on peut voir dans la galaxie, imaginons que nous soyons dans une ville, la nuit, et qu'il y a de la brume.

Avec la brume, on ne peut voir qu'une petite partie de la ville. À moins d'être vraiment en périphérie de la ville, la partie qu'on voit semble s'étendre également dans toutes les directions. Si la visibilité n'est que d'un kilomètre, on aura l'impression que la ville est petite et qu'elle s'étend jusqu'à un kilomètre de nous dans toutes les directions. Si on faisait une carte de la ville à partir de ce qu'on peut voir, on serait au centre de cette partie visible. On verrait toutes les lumières qui sont près de nous, même les lumières très faibles, mais on ne verrait pas les lumières faibles si elles sont trop loin de nous. On aurait alors l'impression qu'il y a beaucoup plus de sources lumineuses près de nous et qu'il y en a peu loin de nous. Si la brume se lève, on



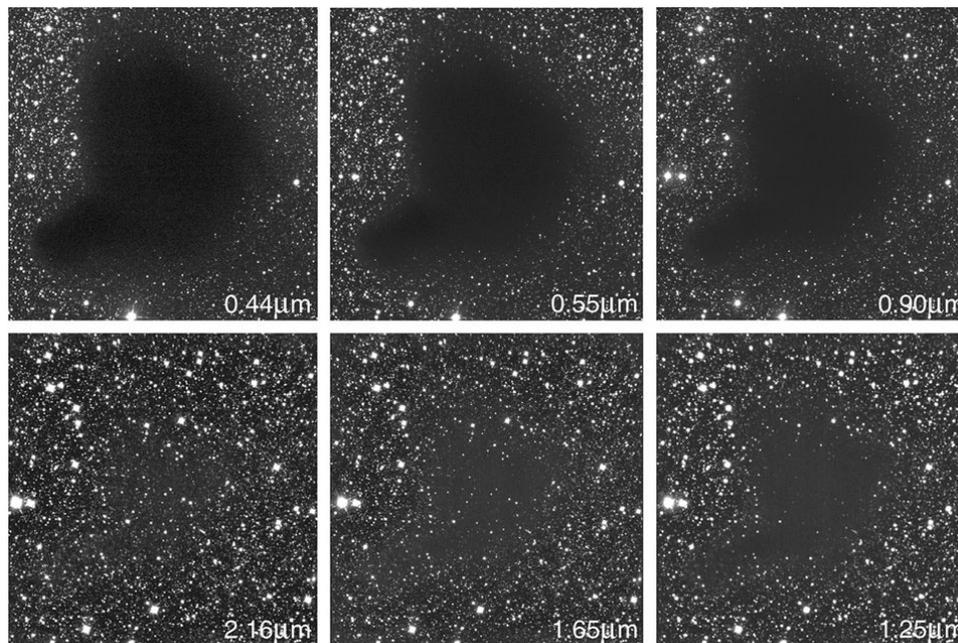
www.harvardcollegeinasia.org/category/uncategorized/

verrait bien que la ville est beaucoup plus grande que ce qu'on voyait et on pourrait constater que nous n'étions pas nécessairement au centre de la ville.

C'est exactement ce qui se passe dans notre galaxie. La poussière joue exactement le même rôle que la brume dans une ville. Elle nous empêche de voir les étoiles très éloignées, de sorte qu'on ne peut voir qu'une partie de la Voie lactée. En limitant notre visibilité de la même façon dans toutes les directions, on constate que nous sommes au centre des étoiles qu'on peut voir si on fait une carte. On voit toutes les étoiles qui sont près de nous, mais on ne voit pas les étoiles peu brillantes qui sont trop loin de nous. On a alors l'impression que la densité d'étoiles diminue à mesure qu'on s'éloigne du Soleil, exactement comme dans le modèle de Kapteyn. Si on enlevait la poussière, on aurait bien vu qu'il y a beaucoup plus d'étoiles que ce qu'on peut voir et on verrait que nous ne sommes pas au centre de la galaxie puisqu'on verrait qu'il y a plus d'étoiles d'un côté de la Voie lactée.

Variation de l'atténuation avec la longueur d'onde

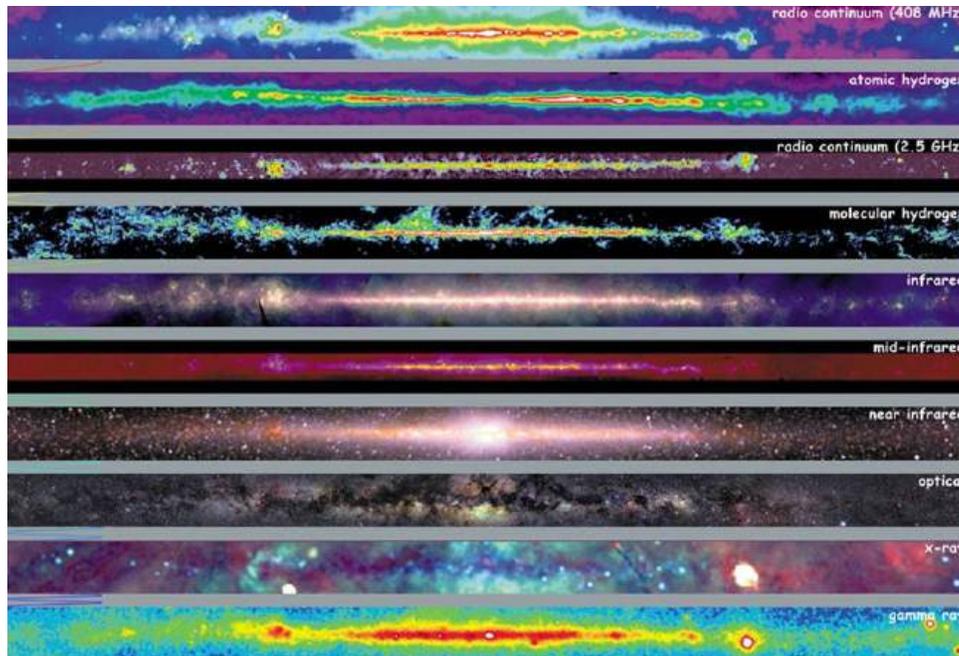
On a vu que la poussière ne bloque pas tous les types de lumière. Certaines longueurs d'onde ne sont pas atténuées par la poussière. Ces images de la nébuleuse Barnard 68 faites à différentes longueurs d'onde montrent que la poussière ne bloque pratiquement pas l'infrarouge ayant une longueur d'onde de 2160 nm.



cseligman.com/text/stars/interstellar.htm

On peut donc voir la Voie lactée au complet en observant à d'autres longueurs d'onde. La poussière laisse particulièrement bien passer l'infrarouge proche.

Voici ce qu'on obtient pour la Voie lactée avec différentes longueurs d'onde. (C'est un montage de photos couvrant toute la Voie lactée.)



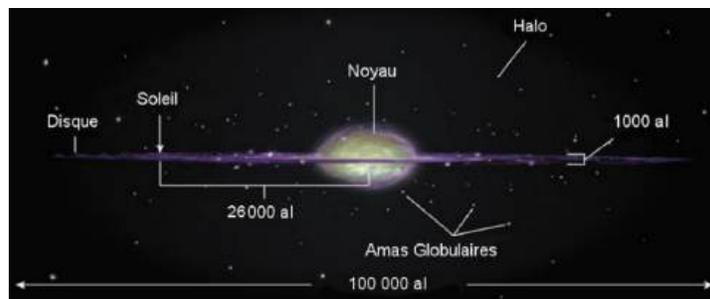
mwmw.gsfc.nasa.gov/mmw_product.html

Examinez la différence entre l'infrarouge proche (near infrared, 4^e image à partir du bas) et le visible (3^e image à partir du bas). En infrarouge, on voit très bien toutes les étoiles formant la galaxie alors qu'en visible, on voit très bien les bandes de poussière sombres qui nous cachent la majorité des étoiles de la galaxie.

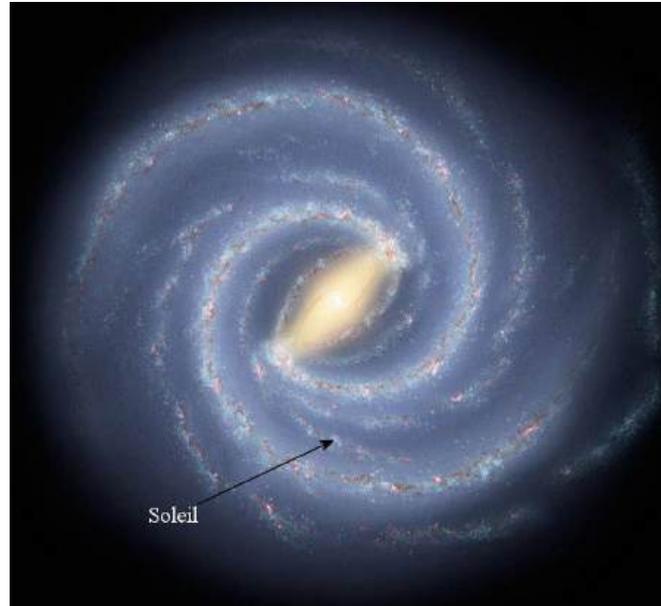
12.5 LA STRUCTURE DE LA VOIE LACTÉE

Les observations, spécialement avec des longueurs d'onde peu affectées par la poussière, ont effectivement confirmé que la Voie lactée avait la forme proposée par Shapley. Toutefois, les dimensions estimées par ce dernier étaient un peu trop grandes puisqu'il estimait mal l'effet de la poussière sur la luminosité des étoiles. Robert Julius Trumpler a fait une première correction des dimensions en 1930 en faisant une meilleure estimation des effets de la poussière. Il y a eu une autre correction en 1952 quand Walter Baade a découvert qu'il y a en réalité deux types de céphéides et que la confusion entre ces deux types de céphéides entraînait de graves erreurs de calculs de distance.

Voici donc ce à quoi ressemble notre galaxie, vue de côté et du dessus, selon les estimations actuelles.



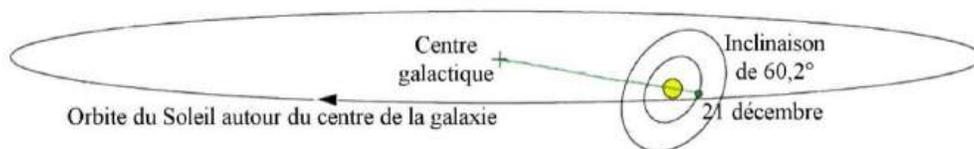
boojum.as.arizona.edu/~jill/NS102_2006/Lectures/MilkyWay/milkyway.html



www.space.com/1442-milky-ways-central-structure-fresh-clarity.html

Le Soleil est à 26 990 al, du centre de la galaxie alors que le diamètre de la galaxie est d'environ 100 000 al. La valeur exacte du diamètre de la galaxie est difficile à définir, car la galaxie ne se termine pas abruptement. Il y a plutôt une diminution graduelle de la densité d'étoiles.

Le plan du Système solaire est incliné d'environ 60° avec le plan de la galaxie. La Terre traverse le plan galactique le 21 juin et le 21 décembre. (C'est un hasard que ce soit les mêmes dates que celles du début de l'été et du début de l'hiver.) Quand la Terre traverse le plan galactique le 21 décembre le Soleil et le centre galactique sont presque alignés vu de la Terre (environ 6° d'écart).



www.u-sphere.com/index.php?title=Activit%C3%A9_solaire_et_influences_gravitationnelles

Les trois parties de la galaxie

La galaxie se divise en trois parties.

1- Le noyau

Le noyau est situé au centre de la galaxie. C'est une région où la galaxie devient un peu plus épaisse qu'ailleurs. Le noyau est presque sphérique avec un rayon de 7000 al. En fait, le noyau est un peu allongé, ce qui lui donne plutôt la forme d'un ballon de football. La masse du noyau représente 5 % de la masse de la galaxie. La

luminosité du noyau est d'environ 2 milliards de luminosités solaires, ce qui représente environ 10 % de la luminosité totale de la galaxie.

2- Le disque

Le disque est la partie très aplatie de la galaxie. C'est un disque qui a un diamètre de 100 000 al et une épaisseur d'environ 1000 al (bien qu'il y ait encore un peu d'étoiles en dehors de ces limites). En fait, l'épaisseur est difficile à déterminer. Le gaz et les jeunes étoiles forment un disque très mince alors que les étoiles plus vieilles s'étendent sur une plus grande épaisseur. On remarque qu'il y a des zones plus brillantes dans le disque qui forment des structures en spirale. Ces zones plus lumineuses portent le nom de *bras spiraux*. On retrouve 90 % de la masse de la galaxie dans le disque. La luminosité du disque est d'environ 16 milliards de luminosités solaires ce qui représente près de 80 % de la luminosité totale de la galaxie.

3- Le halo

Le halo est la partie en dehors du disque qui forme une zone sphérique centrée sur le centre de la Voie lactée et ayant un diamètre de 100 000 al. On retrouve dans cette zone les fameux amas globulaires et quelques étoiles isolées. Il y a environ 200 amas globulaires dans le halo de la Voie lactée. La masse du halo représente 5 % de la masse de la galaxie. La luminosité du halo est d'environ 2 milliards de luminosités solaires, ce qui représente près de 10 % de la luminosité totale de la galaxie.

Les 82 étoiles les plus brillantes de notre ciel, qui sont toutes à moins de 1800 al de la Terre, sont nos voisines immédiates dans le disque de la Voie lactée. Elles sont toutes dans une zone qui représente moins de 0,1 % du volume du disque.

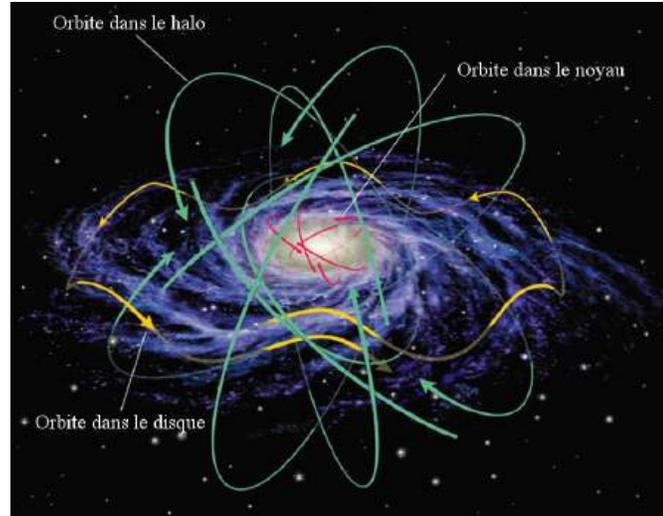
Au total, on estime qu'il y a près de 300 milliards étoiles dans la Voie lactée (les estimations vont en fait de 100 milliards à 400 milliards, cela dépend des estimations du nombre d'étoiles de très faible masse qui sont difficiles à détecter.)

Le mouvement des étoiles dans la galaxie

Les étoiles tournent autour du centre de la galaxie. Le Soleil, qui est à 26 990 al du centre de la galaxie, se déplace à 233,4 km/s autour du centre de la galaxie pour en faire le tour en 218 millions d'années.

Dans le halo et le noyau, les étoiles tournent autour du centre de la galaxie un peu dans n'importe quelle direction, ce qui amène les étoiles du halo à parfois traverser le disque. D'ailleurs, tout semble indiquer que l'étoile Arcturus, 4^e plus brillante du ciel, est une étoile du halo traversant en ce moment le disque de la galaxie à une trentaine d'années-lumière de nous.

Dans le disque, toutes les étoiles tournent dans le même sens. Avec un disque de matière, on peut obtenir des orbites un peu plus exotiques qu'une simple rotation autour du centre de la galaxie. Il est possible qu'une étoile passe d'un côté (le dessous du disque) à l'autre (le dessus du disque) tout en tournant autour du centre de la galaxie. L'attraction gravitationnelle du disque ramène toujours l'étoile vers le disque, ce qui lui fait faire une oscillation d'un côté à l'autre.



boojum.as.arizona.edu/~jill/NS102_2006/Lectures/MilkyWay/milkyway.html

Le Soleil a une telle orbite, ce qui nous fait parfois sortir du disque. L'oscillation d'un côté à l'autre du disque est un processus qui prend plusieurs millions d'années. Ainsi, dans 15 millions d'années, le Soleil atteindra sa hauteur maximale au-dessus du disque. À ce moment, nous serons sortis de la poussière présente dans le disque et nous pourrions alors bien voir le noyau de la galaxie (à condition qu'il y ait encore des humains sur Terre).

Certains pensent que ce mouvement d'oscillation peut être lié à un cycle d'extinction de 62 millions d'années. Quand le Système solaire traverse le disque, le gaz présent dans le disque ferait diminuer la zone de protection offerte par le vent solaire, ce qui ferait augmenter la quantité de rayons cosmiques qui arrivent sur Terre. Les effets néfastes de ces rayons produiraient alors une extinction. L'idée est loin de faire l'unanimité.

La densité d'étoiles

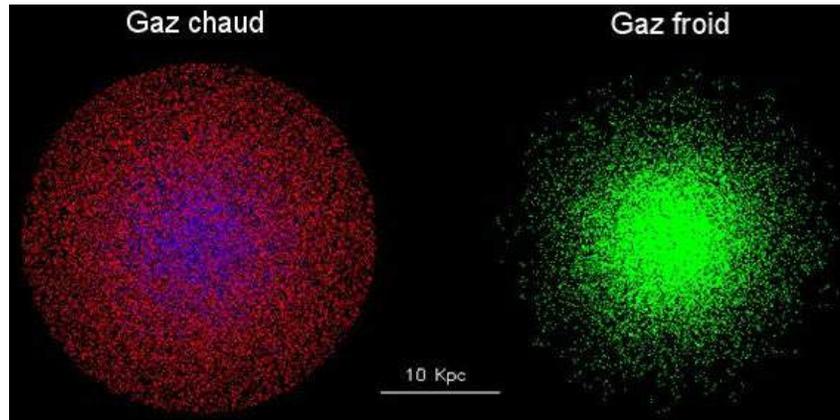
Dans le disque, la distance moyenne entre les étoiles est aux alentours de 3 al, pour une densité d'environ 3,5 étoiles par cube de 10 al de côté. Cette densité est environ 500 000 fois plus grande dans le noyau pour atteindre près de 1 500 000 étoiles par cube de 10 al de côté. Si le Système solaire était dans le noyau, on pourrait voir dans le ciel environ 500 000 d'étoiles aussi brillantes que Sirius, l'étoile la plus brillante de notre ciel. L'intensité totale de la lumière des étoiles serait environ égale à 100 fois celle de la pleine Lune. Autant dire qu'il n'y aurait pas vraiment de nuit. L'étoile la plus près serait environ à seulement 1000 UA du Soleil (c'est un peu moins de 0,02 al).

12.6 LES BRAS SPIRAUX

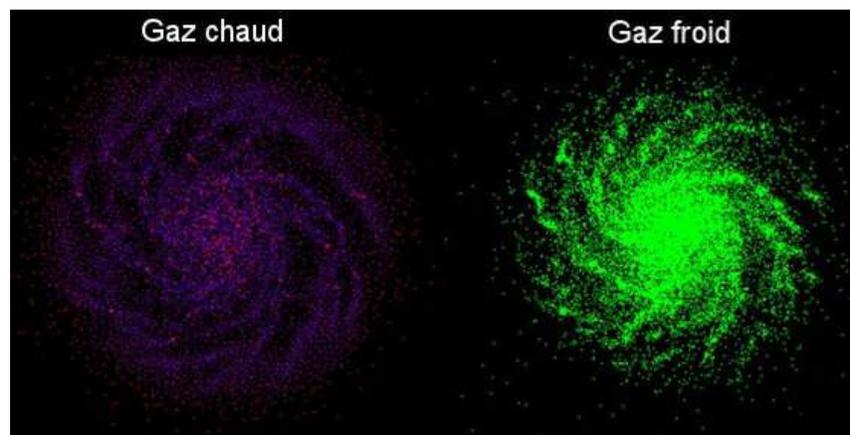
Des zones plus denses

Les bras spiraux sont des régions de la galaxie où la matière est un peu plus dense.

Pourquoi la densité est-elle un peu plus grande dans les bras spiraux ? Bien que tous les détails ne soient pas bien compris, il semble que cela se fait naturellement par l'attraction gravitationnelle de la matière à l'intérieur de la galaxie. Par exemple, on peut faire des simulations où on fait tourner de la matière autour du centre de la galaxie en tenant compte de l'attraction gravitationnelle des objets entre eux. Dans la simulation montrée sur l'image suivante, on a commencé avec du gaz réparti uniformément autour du centre.



Voici ce qu'on obtient avec cette simulation au bout de 150 millions d'années.



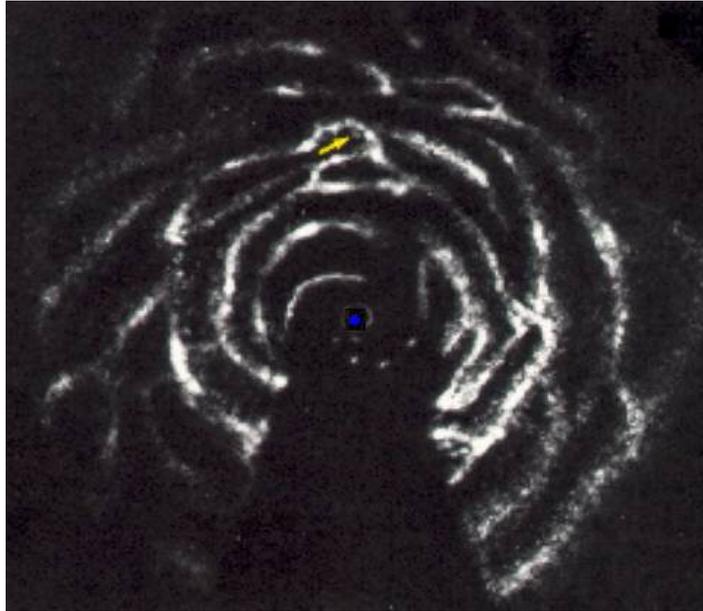
L'attraction gravitationnelle forme des zones en forme de spirales où le gaz et les étoiles sont plus concentrés. Ces bras spiraux tournent lentement autour de la galaxie.

Ce n'est pas toujours la même matière qui se retrouve dans les bras puisque ces zones de densité élevée tournent autour de la galaxie moins vite que les étoiles et le gaz tournent autour de la galaxie. Ainsi, une étoile en rotation autour de la galaxie rattrape les bras spiraux de sorte qu'elle traverse le bras pour ressortir devant le bras, puis elle rattrape le bras suivant pour le traverser et ainsi de suite. Le vidéo suivant illustre ce mouvement des étoiles.

<https://www.youtube.com/watch?v=c5Us-jonCLA>

Le gaz dans la galaxie traverse aussi les bras de cette façon en les rattrapant. Les bras sont un peu comme des ondes de pression qui se propagent dans la galaxie.

Comme la poussière bloque beaucoup la lumière des étoiles dans le disque, ce n'est pas si facile de voir qu'il y a des bras spiraux dans notre galaxie. Le fait que les autres galaxies du même type dans l'univers aient des bras spiraux suggère fortement que notre galaxie doit aussi avoir des bras spiraux. On peut toutefois mettre les bras en évidence grâce au rayonnement à 21 cm émit par les nuages d'hydrogène HI. On se rappelle que la poussière a très peu d'effet sur ces ondes radio, ce qui signifie qu'on peut voir des nuages de gaz très lointains sans la moindre atténuation. On peut donc obtenir une image assez complète de la Voie lactée avec ces ondes radio. Comme les nuages d'hydrogène HI sont des zones d'hydrogène un peu plus concentré, ils se forment surtout dans les zones de densité plus élevée, donc dans les bras spiraux. En trouvant la position de ces nuages, on devrait donc trouver les bras spiraux de notre galaxie. Les résultats de ces mesures montrent clairement la présence de bras spiraux dans notre galaxie (la flèche jaune indique la position du Soleil).



www.icc.dur.ac.uk/~tt/Lectures/Galaxies/Schombert/MilkyWay/Source/Html/MilkyWay.html

Pourquoi les bras spiraux sont-ils plus brillants ?

Les nuages de gaz traversent donc, à l'occasion, les bras spiraux. Le passage du nuage de gaz dans ces régions un peu plus denses provoque souvent l'effondrement du nuage. En passant dans le bras, la densité du gaz augmente, ce qui signifie que le nuage se contracte un peu. Il est alors possible que cette contraction amène le nuage à avoir une taille inférieure à la taille critique pour qu'il y ait contraction, ce qui mène à la naissance d'étoiles. Ainsi les naissances d'étoiles se font souvent dans les bras spiraux.

Les étoiles peu massives vont vivre assez longtemps pour ressortir de l'autre côté du bras spiral. Elles pourront même traverser plusieurs autres bras durant leur vie. Cependant, les étoiles très massives vivent tellement peu de temps qu'elles n'auront même pas le temps de sortir du bras qui les a vues naître. Cela signifie qu'on retrouve pratiquement toutes les étoiles très massives uniquement dans les bras spiraux. Comme ces étoiles sont très brillantes, cela fait en sorte que les bras spiraux sont beaucoup plus brillants que le reste de la galaxie.

De plus, on remarque que les nuages d'hydrogène HII se retrouvent principalement dans les bras spiraux. Ces nuages sont lumineux parce qu'une étoile très massive excite l'hydrogène qui l'entoure. Puisque les étoiles très massives se retrouvent presque

exclusivement dans les bras, les nuages d'hydrogène HII sont presque exclusivement dans les bras.

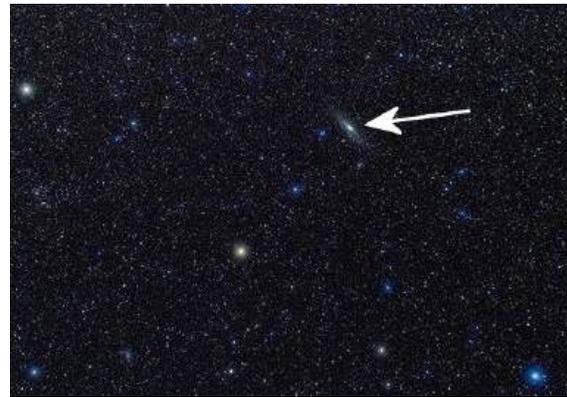
Sur l'image de droite, on remarque que la grande majorité des nébuleuses d'hydrogène ionisé, associée à la naissance d'étoiles très lumineuses, se retrouvent dans les bras spiraux, indiquant que ce sont dans les bras que naissent ces puissantes étoiles. (Évidemment, ce n'est pas la Voie lactée, c'est une autre galaxie du même type que la nôtre.)



star1034.egloos.com/2230281

12.7 LA DÉCOUVERTE DES AUTRES GALAXIES

On peut voir, à l'œil nu, une tache floue allongée et peu brillante dans la constellation d'Andromède. On l'appelait autrefois la nébuleuse d'Andromède. L'astronome Abd al-Rahman al-Soufi est le premier, en l'an 964, à la mentionner.



www.astropixels.com/blog/2012/12/andromeda-galaxy/and-01w/



Avec l'invention du télescope, on a pu obtenir des images toujours plus détaillées de cette nébuleuse. On est parvenu à voir encore plus de détails à partir du moment où on a pu faire des photographies à longues expositions des objets (image de gauche).

www.newforestobservatory.com/2007/11/08/more-m31-andromeda-galaxy-pictures/

Il n'y avait pas que la nébuleuse d'Andromède. Depuis l'invention du télescope, le nombre de nébuleuses connues ne cessait d'augmenter. Halley en liste 6 en 1715, Charles Messier en catalogue 110 en 1784, Caroline et William Herschel en connaissent environ 2500 au

début du 19^e siècle, John Herschel en catalogue 5079 en 1838 et le New General Catalogue de 1888 en contient 7840. Évidemment, ces nébuleuses ne sont pas toutes des galaxies, mais la plupart des 7840 nébuleuses du New General Catalogue sont des galaxies. En 1845, William Parson, comte de Rosse, remarquait que plusieurs de ces nébuleuses avaient des bras spiraux. Elles sont alors devenues les « nébuleuses spirales ». En 1898, James Keeler avait photographié plus de 10 000 de ces nébuleuses spirales.

Les images des nébuleuses spirales ont fortement animé les passions des astronomes du 19^e siècle. Plusieurs étaient certains d'assister à la formation d'une étoile entourée de son disque protoplanétaire. Cette hypothèse semble logique si on pense que la nébuleuse est assez près de la Terre. William Herschell pensait même que la nébuleuse d'Andromède était la nébuleuse la plus près de la Terre puisqu'elle est visible à l'œil nu.

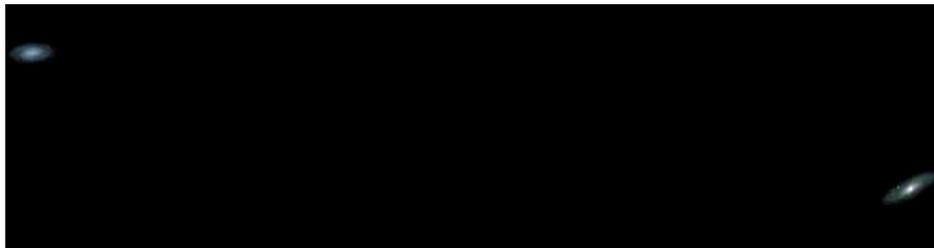
Puis, les indices montrant que ces nébuleuses spirales sont probablement très loin ont commencé à s'accumuler. En 1912, on mesure la vitesse de rotation du disque de la nébuleuse d'Andromède grâce à l'effet Doppler pour arriver à une vitesse de 300 km/s. C'était la plus grande vitesse mesurée pour un objet céleste à cette époque et c'est une vitesse beaucoup trop grande pour un disque protoplanétaire. En 1917, Herber Curtis découvre des novas dans la nébuleuse d'Andromède. La faible intensité de ces novas, 10 magnitudes plus élevées que les autres novas observées ailleurs, semble indiquer que la nébuleuse est très éloignée de nous. Les résultats de Curtis lancent alors le débat, appelé *le grand débat*, qui oppose les astronomes qui pensent que les nébuleuses spirales sont à l'intérieur de la Voie lactée et les autres astronomes qui pensent que les nébuleuses sont en dehors de la Voie lactée. Ce débat oppose principalement Curtis et Shapley. Curtis pense que l'univers était parsemé de nombreuses galaxies comme la Voie lactée. Il place cependant notre Soleil au centre d'une Voie lactée relativement petite (l'univers de Kapteyn). Pour Shapley, les nébuleuses spirales sont dans notre galaxie qui est une très grande galaxie dans laquelle le Soleil est en périphérie. (Étonnamment, chaque camp avait en partie raison puisque notre galaxie est grande comme le disait Shapley et les nébuleuses spirales sont en dehors de notre galaxie comme le disait Curtis.)

Le débat se termine en partie quand Edwin Hubble découvre des céphéides dans certaines nébuleuses (NGC 6822 en 1924, la galaxie du Triangle en 1926 et Andromède en 1929), ce qui lui permet de déterminer leur distance. Il obtient alors des distances (environ 1 million d'années-lumière pour Andromède) qui placent ces objets bien en dehors de la Voie lactée, même pour Shapley qui surestime les dimensions de la Voie lactée d'un facteur 3. Hubble arrive donc rapidement à la conclusion ces nébuleuses doivent être d'autres galaxies. Il vient de découvrir que la **nébuleuse** d'Andromède est en réalité la **galaxie** d'Andromède. Très vite, on découvre que d'autres nébuleuses sont aussi des galaxies et il devient alors évident que la Voie lactée n'est qu'une galaxie parmi toutes ces galaxies.

Les astronomes ont longtemps pensé que les distances mesurées par Hubble étaient les bonnes. Après tout, les mesures de distance avec les céphéides sont assez précises et relativement simples. On a toutefois toute une surprise en 1949 quand le télescope de 200 pouces du mont Palomar est mis en fonction. Avec ce télescope, on aurait dû

pouvoir observer des étoiles RR de la Lyre dans la galaxie d'Andromède si elle était vraiment à une distance de 1 million d'années-lumière. Mais Walter Baade a beau observer Andromède avec minutie, il ne les voit pas. Après une étude qui dure quelques années, il en conclut que Hubble a fait une grave erreur. Il a comparé les céphéides des nébuleuses non pas avec des céphéides dans notre galaxie, mais avec un autre type d'étoiles variables dans notre galaxie, des étoiles de type W de la Vierge (W Virginis). Or, ces étoiles variables sont 4 fois moins lumineuses que les céphéides pour des périodes identiques. Hubble a donc sous-estimé la luminosité des céphéides des nébuleuses d'un facteur 4, ce qui l'a amené à sous-estimer la distance des galaxies d'un facteur 2. Les travaux de Baade montrent donc que l'univers est environ 2 fois plus grand que ce qu'on croyait à ce moment. C'est un véritable choc pour les astronomes de cette époque (début des années 50).

Aujourd'hui, on estime que la distance de la galaxie d'Andromède est de 2,5 millions d'années-lumière. On se rappelle que la Voie lactée a un diamètre d'environ 100 000 années-lumière. L'image suivante montre la distance entre les galaxies par rapport à leur taille.



La galaxie d'Andromède est assez semblable à notre Voie lactée. On ne sait toujours pas avec certitude si notre galaxie est plus ou moins massive que la galaxie d'Andromède. La plupart du temps, on estime qu'Andromède est plus massive que la Voie lactée, mais les incertitudes sont encore bien grandes. Tout comme la Voie lactée, la galaxie d'Andromède est composée de centaines de milliards d'étoiles formant un disque et tournant autour du centre de la galaxie.

Aujourd'hui, on estime qu'il y a environ 75 milliards de galaxies visibles à partir de la Terre. On obtient cette estimation en prenant un cliché d'une région du ciel où il n'y a pas d'étoiles de notre galaxie. Ce cliché se fait avec un temps de pose très long, ce qui permet d'observer des objets très peu lumineux, comme des galaxies très lointaines.

Tous les objets de cette image, incluant le moindre petit point lumineux, sont des galaxies.



www.firstpr.com.au/astrophysics/hubble-deep-field/

On compte alors le nombre de galaxies sur l'image, une tâche que les chercheurs donnent à leurs étudiants à la maîtrise ou au doctorat. Sur cette image, on arrive à près de 850 galaxies. On suppose ensuite que les galaxies sont réparties uniformément dans le ciel. Comme cette image ne représente que $1/87\,300\,000$ du ciel, on calcule qu'il doit y avoir $850 \times 87\,300\,000 = 74$ milliards de galaxies dans le ciel. 75 milliards de galaxies avec chacune contenant environ 100 milliards d'étoiles, ça fait vraiment beaucoup d'étoiles dans l'univers. Et encore, on ne parle que de l'univers visible depuis la Terre.

Évidemment, on a pris de telles images dans plusieurs régions du ciel pour s'assurer que la densité de galaxie est bel et bien la même dans toutes les directions.

Quelques galaxies ont un nom précis, mais la plupart du temps, on les désigne par un simple numéro de catalogue de nébuleuses. Il n'y a pas que des galaxies qui se retrouvent dans ces catalogues, car les nébuleuses incluent tous les nuages de gaz lumineux en plus des galaxies. Pour les 110 nébuleuses les plus brillantes vues de la Terre, on peut utiliser le catalogue Messier. La galaxie d'Andromède peut donc aussi être désignée comme étant M31 (le 31^e objet du catalogue Messier). Pour les 7840 nébuleuses les plus brillantes vues de la Terre, on peut utiliser le New General Catalogue (toujours utilisé et révisé plusieurs fois). Plusieurs galaxies se retrouvent parmi ces nébuleuses, dont la galaxie d'Andromède (numéro 224 dans ce catalogue). La galaxie d'Andromède porte donc aussi le nom de NGC 224. Il y a bien d'autres catalogues utilisés, mais nous nous contenterons des catalogues Messier et NGC.

12.8 LES TYPES DE GALAXIES

En observant toutes ces galaxies, on se rend compte assez rapidement qu'elles ne sont pas toutes identiques. Il y a en fait trois types principaux de galaxies : les galaxies spirales, les galaxies elliptiques et les galaxies irrégulières.

Les galaxies spirales

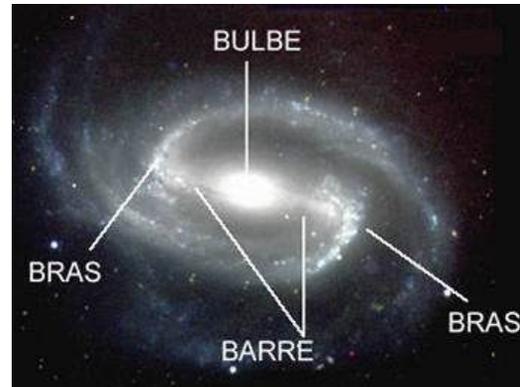
Les spirales et les spirales barrées

Les galaxies spirales, comme M 101 sur l'image, ont une structure identique à celle de la Voie lactée. Elles ont donc un bulbe central (aussi appelé noyau), des bras spiraux et un halo.



en.wikipedia.org/wiki/Pinwheel_Galaxy

Les galaxies spirales non barrées, appelées simplement les galaxies spirales, ont un bulbe central sphérique (comme M101). Les galaxies spirales barrées ont un bulbe plus ou moins allongé qui forme une barre.



jacques.rosu.perso.sfr.fr/univers/galaxies/spirale/page1/spirale1.html

Le tiers des galaxies spirales ne sont pas barrées, un autre tiers est barré alors que le dernier tiers est dans la catégorie des spirales barrées incertaines. La présence d'une barre dans une galaxie spirale est peut-être un phénomène temporaire. Il se pourrait que la galaxie oscille entre la spirale et la spirale barrée avec une période de plusieurs millions d'années.

Les galaxies spirales (barrées ou non) ont une masse variant entre 1 milliard et 2000 milliards de M_{\odot} et un diamètre variant entre 5 000 et 200 000 al. Leur luminosité varie entre 100 millions et 40 milliards de L_{\odot} .

Ces galaxies contiennent, en plus des étoiles, beaucoup de gaz et de poussière, principalement dans le disque (il n'y a pas beaucoup de poussière dans le bulbe et le halo).

Différence dans l'âge des étoiles

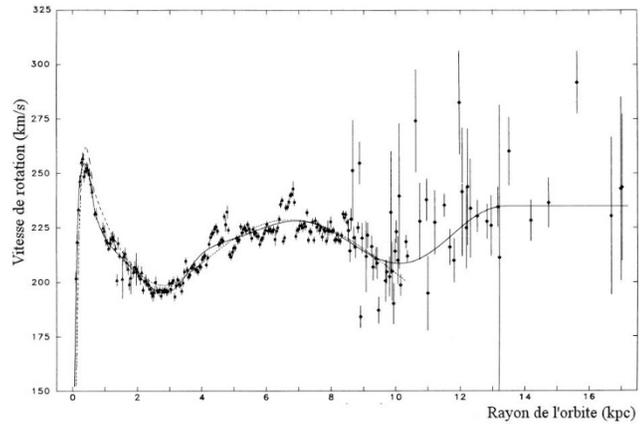
On remarque une différence de couleur entre le bulbe et le disque. C'est que la luminosité du disque est dominée par des étoiles très massives qui ont un éclat plutôt bleu alors que la luminosité du bulbe est dominée par des étoiles moins massives qui ont un éclat plus jaunâtre. Il y a cette différence parce que le disque est une région où il se forme beaucoup d'étoiles. Il y apparaît donc des étoiles bleues très massives et très lumineuses dont l'énorme luminosité domine. Dans le bulbe, il n'y a pratiquement pas de formation d'étoiles, sauf peut-être près du centre du bulbe. Sans nouvelle naissance, les étoiles sont plutôt vieilles et il n'y a pas d'étoiles bleues très massives et très lumineuses qui ont une vie très courte. Sans ces étoiles massives, la luminosité vient principalement d'étoiles moins massives, qui ont un éclat jaune.

Les étoiles du halo sont également très vieilles. Il ne s'est pas formé de nouvelles étoiles dans le halo de la Voie lactée depuis des milliards d'années.

Le mouvement des étoiles

Comme pour la Voie lactée, les étoiles tournent presque toutes dans le même plan et dans la même direction dans le disque alors que les orbites ont des orientations aléatoires dans le bulbe et le halo.

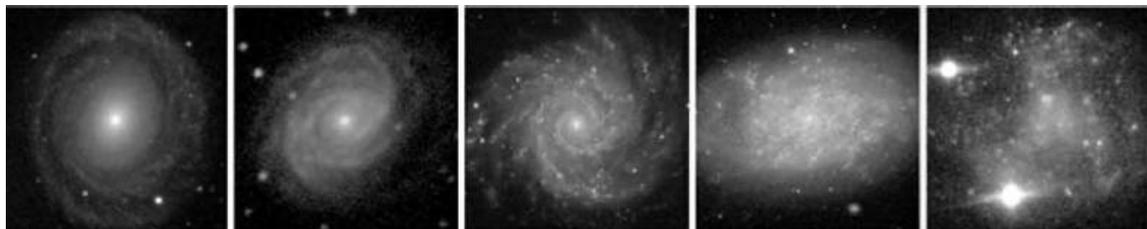
Les mesures des vitesses des objets en orbite autour du centre galactique montrent que la vitesse se stabilise à une certaine valeur, peu importe la distance du centre de la galaxie. Dans le cas de la Voie lactée, la vitesse des objets reste aux environs de 240 km/s.



web.njit.edu/~gary/321/Lecture19.html

Classification

Les bras spiraux des galaxies spirales peuvent être plus ou moins serrés les uns contre les autres. On classe les galaxies spirales non barrées dans les catégories SAa, SAb ou SAc selon le degré d'enroulement des bras (plus serré pour a à moins serrés pour c). Dans la catégorie SAd, les bras sont diffus ou brisés. Dans la catégorie SAm, on voit des bras, mais on distingue mal le noyau de la galaxie spirale. On utilise un *m* parce que le grand nuage de Magellan est dans cette catégorie. (Il arrive souvent qu'on laisse tomber le A dans ces notations pour avoir les catégories Sa, Sb, Sc, Sd et Sm.)



SAa

SAb

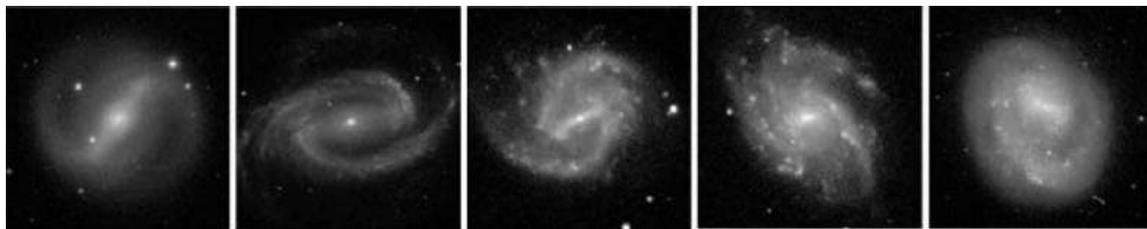
SAc

SAd

SAm

ned.ipac.caltech.edu/level5/Sept11/Buta/Buta5.html

On a la même classification pour les spirales barrées, mais on remplace le A par un B.



SBa

SBb

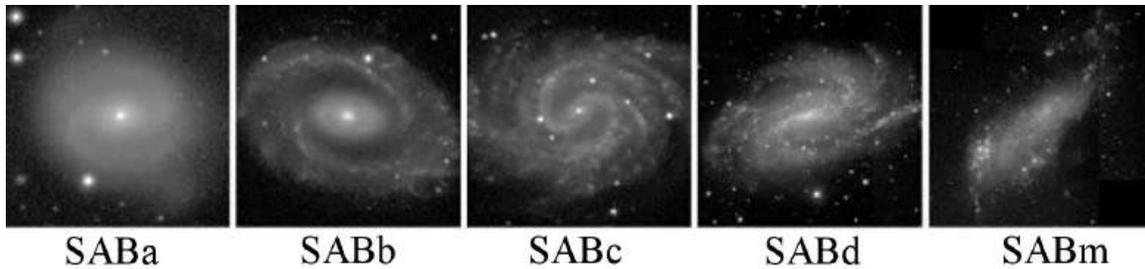
SBc

SBd

SBm

La Voie lactée semble d'ailleurs être une galaxie spirale barrée de type SBc ou d'un type se situant entre les types SBb et SBc, qu'on note SBbc.

Si la présence d'une barre est incertaine, on utilise les lettres A et B en même temps.



Différence selon les catégories

Il y a quelques autres différences selon ces catégories.

Il y a premièrement une différence dans la luminosité de bulbe central. Pour les types SAa ou SBa, la luminosité de noyau correspond à 30 % de la luminosité totale de la galaxie. Cette proportion diminue à 13 % pour les galaxies SAb et SBb, puis à 5 % pour les galaxies de type SAc et SBc.

On note aussi une différence dans la vitesse de rotation de la matière dans le disque de la galaxie. La vitesse atteint, en moyenne, 299 km/s pour la galaxie de type SAa et SBa, 222 km/s pour les galaxies de type SAb et SBb et 175 km/s pour les galaxies de type SAc et SBc. Il y a toutefois beaucoup de variations de vitesse selon le type. Par exemple, les vitesses de rotation maximales des galaxies SAa et SBa varient entre 163 km/s et 367 km/s alors que pour les galaxies SAc et SBc, les vitesses varient entre 99 km/s et 304 km/s.

On note aussi que la proportion de gaz n'est pas la même. La proportion de la masse de la galaxie sous forme de gaz est de 4 % pour les galaxies SAa et SBa, 8 % pour les galaxies SAb et SBb, 16 % pour les galaxies SAc et SBc et 25 % pour les galaxies SAc et SBc (un type entre c et d). Comme une proportion de gaz plus élevée favorise la formation d'étoiles, on retrouve davantage de jeunes étoiles massives et très brillantes dans les galaxies de type SAc et SBc. Puisque ces étoiles émettent une lumière bleue très intense, les galaxies SAc et SBc sont donc un peu plus bleues que les galaxies SAb et SBb et encore plus bleues que les galaxies SAa et SBa.

Les galaxies lenticulaires

Dans ce type de galaxie, on voit bien qu'il y a un bulbe, un disque et de la poussière, mais on ne distingue pas de bras spiraux.

Les galaxies lenticulaires sont notées SA0 ou SB0 selon qu'il y ait une barre ou non dans le bulbe.

en.wikipedia.org/wiki/File:NGC_2787.jpg



La galaxie montrée sur la figure (NGC 2787) est une galaxie lenticulaire. En fait, c'est une galaxie lenticulaire barrée de type SB0.

Il y a parfois un anneau

Parfois, il y a un anneau autour du bulbe des galaxies spirales ou lenticulaires, comme cette galaxie (M95).

Quand il y a un anneau interne, on ajoute (*r*) pour *ring* à la classification. M95 est donc du type SB(*r*)b.

apod.nasa.gov/apod/ap190529.html



Les galaxies elliptiques

Description

Les galaxies elliptiques ont une structure bien différente des galaxies spirales. Elles n'ont pas de disque, pas de bras spiraux. Ce sont simplement des sphères plus ou moins allongées.

Sur la figure, on peut voir M87, une de ces galaxies elliptiques.

Elles ne contiennent que très peu de gaz (1 % de la masse de la galaxie) et de poussière. Comme il y a peu de gaz, il n'y a pas vraiment de formation de nouvelles étoiles. Les étoiles de ce type de galaxie sont donc très vieilles. Les étoiles bleues (très massives) ne vivent pas très longtemps, il n'y en a plus dans les galaxies elliptiques, ce qui leur donne une teinte plutôt jaune.



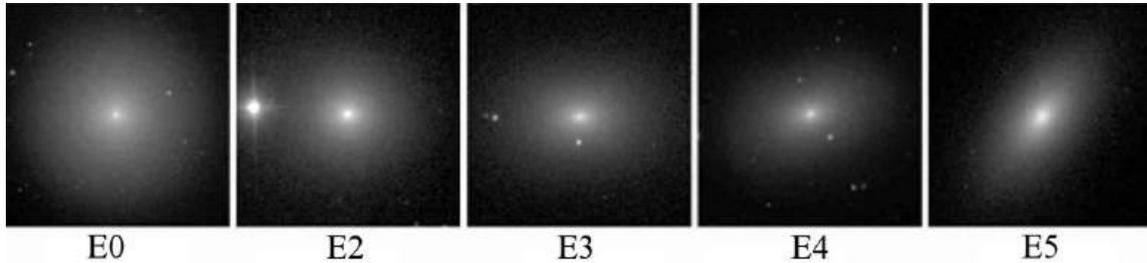
www.cidehom.com/recherche.php?_mots=la+galaxie+m87&quoi_aff=3&_page=110828

Dans une galaxie elliptique, les étoiles tournent dans toutes les directions et avec un plan orbital ayant n'importe quelle orientation.

La masse des galaxies elliptiques varie entre 1 million et 30 000 milliards de M_{\odot} alors que leur diamètre varie entre 1 000 al et 500 000 al. Leur luminosité varie entre 1 million et 1000 milliards de L_{\odot} . On voit que les plus grosses galaxies ont 15 fois la masse, 2,5 fois le diamètre et 25 fois la luminosité des plus grosses galaxies spirales.

Classification

Les galaxies elliptiques sont classées en fonction de l'étirement de la galaxie, allant de la galaxie sphérique (E0) à la galaxie plus allongée (E7).



Il y a aussi quelques autres catégories pour les galaxies elliptiques.

dE	Naine elliptique
dSph	Naine sphéroïdale
gE	Elliptique géante
cD	Elliptique géante montrant une enveloppe diffuse et située au centre des amas de galaxies

Les galaxies irrégulièresDescription

Comme leur nom l'indique, les galaxies irrégulières n'ont pas de structure particulière. On les note Irr. Elles sont généralement peu massives (entre 1 million et 10 milliards de M_{\odot}), petites (diamètre variant entre 1 000 et 10 000 al) et peu lumineuses (entre 10 millions et 2 milliards de L_{\odot}). Elles contiennent beaucoup de gaz (environ 30 % de la masse totale) et de la poussière ce qui signifie qu'il peut encore y avoir des formations d'étoiles dans ces galaxies. En fait, la



apod.nasa.gov/apod/ap081229.html

composition de ces galaxies est identique à celle des galaxies spirales, sauf qu'il n'y a pas de structure à grande échelle dans la galaxie comme le bulbe, le disque et les bras spiraux.

Les plus grosses galaxies irrégulières ont des masses, des tailles et des luminosités assez semblables à celles de plus petites galaxies spirales. Il semblerait donc qu'une galaxie contenant des étoiles, de la poussière et du gaz soit une galaxie spirale, à condition que sa masse soit suffisante pour que la structure spirale apparaisse. En bas d'une certaine masse, se situant entre 1 milliard et 10 milliards de masses solaires selon les conditions, la galaxie a une structure plutôt désorganisée.

Résumé des caractéristiques des types de galaxies

	Galaxies spirales et spirales barrées	Galaxies elliptiques	Galaxies irrégulières
Forme	Disque mince avec bras spiraux avec un bulbe plus ou moins allongé au centre.	Sphère plus ou moins allongée.	Pas de forme précise.
Masse	Entre 1 milliard et 2000 milliards de M_{\odot}	Entre 1 million et 30 000 milliards de M_{\odot}	Entre 1 million et 10 milliards de M_{\odot}
Diamètre	Entre 5 000 et 200 000 al	Entre 1 000 et 500 000 al	Entre 1 000 et 10 000 al
Luminosité	Entre 100 millions et 40 milliards de L_{\odot}	Entre 1 million et 1000 milliards de L_{\odot}	Entre 10 millions et 2 milliards de L_{\odot}
Étoiles	Étoiles d'âge variables dans le disque, vieilles étoiles dans le halo.	Vieilles étoiles	Étoiles d'âge variable
Gaz et poussière	Présent dans le disque	Très peu	Présent
Formation d'étoiles	De nouvelles étoiles naissent encore	Il n'y a plus de naissances d'étoiles	De nouvelles étoiles naissent encore
Mouvement des étoiles	Disque : étoiles en rotation autour du centre. Bulbe et halo : mouvements aléatoires.	Mouvements aléatoires	Mouvements aléatoires

Proportion de chaque type de galaxie

Voici la proportion des types de galaxies des galaxies connues :

Spirales ou spirales barrées	77 %
Elliptiques	20 %
Irrégulières	3 %

Toutefois, les galaxies irrégulières sont moins lumineuses et plus difficilement observables. Elles sont donc sous-représentées dans la liste des galaxies connues. En prenant uniquement des galaxies à moins de 30 millions d'années-lumière, distance qui permet de voir les galaxies irrégulières, la proportion est la suivante.

Spirales ou spirales barrées	33 %
Elliptiques	13 %
Irrégulières	54 %

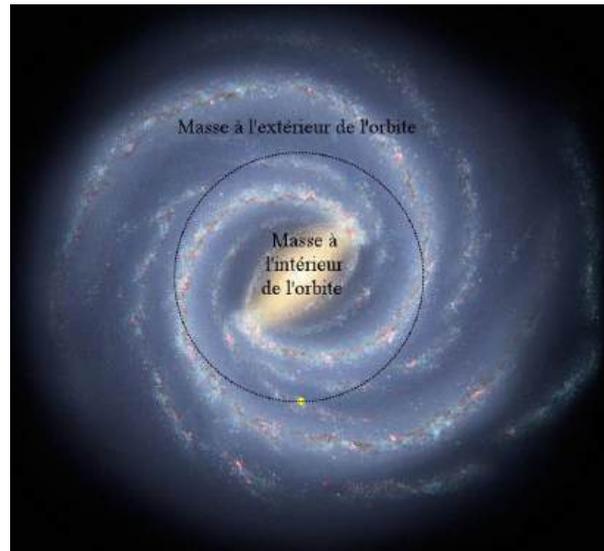
Ces proportions devraient être assez près des véritables proportions de galaxies dans l'univers.

12.9 LA MASSE DES GALAXIES

La masse à partir du mouvement d'une étoile

On peut déduire la masse des galaxies à partir de la loi de la gravitation. La force d'attraction gravitationnelle sur une étoile en orbite doit être égale à la force centripète puisque l'étoile fait un mouvement circulaire autour du centre de la galaxie.

Avec la loi de la gravitation, on peut montrer que seule la masse à l'intérieur de l'orbite de l'étoile fait une force d'attraction nette. Les masses à l'extérieur de l'orbite font aussi des forces gravitationnelles sur l'étoile, mais la somme de ces forces est nulle.



www.space.com/1442-milky-ways-central-structure-fresh-clarity.html

Par exemple, en utilisant la vitesse du Soleil autour du centre de la galaxie et la distance entre le Soleil et le centre de la galaxie, on peut trouver la masse à l'intérieur de l'orbite de la Terre. On peut alors calculer qu'il y a une masse de 104 milliards de masses solaires à l'intérieur de l'orbite du Soleil.

En mesurant la vitesse d'étoiles plus éloignées du centre de la galaxie, on obtient une masse encore plus grande. C'est logique puisqu'avec une orbite plus grande, il y a plus de masse à l'intérieur de l'orbite. Si on calcule la masse en prenant une étoile très loin du centre, sur le bord du disque ou même encore plus loin, on trouve la masse de toute la galaxie (parce qu'il y a une baisse graduelle de la densité d'étoile au bord du disque et qu'il y a donc des étoiles qui tournent autour de la galaxie, mais qui sont pratiquement à l'extérieur de la galaxie).

Avec la vitesse de rotation d'objets très éloignés du centre de la Voie lactée, on obtient une masse se situant **entre 1000 milliards et 1500 milliards de masses solaires**. Nous utiliserons ici 1250 milliards de masses solaires.

Le problème de la masse manquante

Il y a toutefois un sérieux problème quand on mesure la masse totale des galaxies avec cette méthode. La masse obtenue est beaucoup plus grande que la masse des étoiles.

Dans la Voie lactée par exemple, on estime qu'il y a 300 milliards d'étoiles et que la masse totale de ces étoiles est d'environ $80 \times 10^9 M_{\odot}$, soit 80 milliards de masses solaires. On est bien loin du compte de 1250 milliards de masses solaires pour la masse totale de la Voie lactée. La masse totale est près de 16 fois plus grande que la masse des étoiles ! En fait, toutes les galaxies nous donnent une masse bien supérieure à celle des étoiles dans la galaxie. En moyenne, la masse des galaxies est environ 20 fois plus que ce qu'on aurait uniquement avec des étoiles.

Cela montre qu'il y a beaucoup plus de masse dans les galaxies que la masse des étoiles. On pourrait penser que cette masse manquante vient de la masse du gaz et de la poussière dans la galaxie. Toutefois, on peut détecter ce gaz puisqu'il émet un rayonnement et on estime que la masse de cette matière interstellaire ne représente qu'au maximum 30 % de la masse des étoiles des galaxies. Quant à la poussière, sa masse ne dépasse jamais 5 % de la masse des étoiles. Le gaz et la poussière ne peuvent donc pas expliquer l'énorme masse des galaxies. On imagine aussi difficilement comment les planètes, les naines brunes, les étoiles à neutrons ou les trous noirs pourraient avoir une masse totale 20 fois plus grande que la masse des étoiles.

Chose certaine, la matière qui compose cette masse est difficilement détectable avec toutes les longueurs d'onde du spectre électromagnétique, d'où le nom de *matière sombre* donné à cette masse.

Ces masses obtenues plus grandes que la masse de la matière visible sont notre première preuve de l'existence de matière sombre dans l'univers.

Première preuve de l'existence de la matière sombre

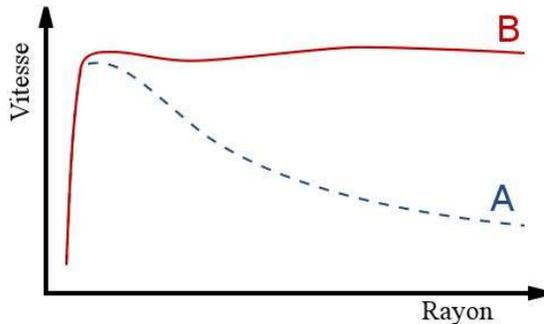
La masse des galaxies mesurée à l'aide de la gravitation est beaucoup plus grande (environ 20 fois plus grande) que la masse des étoiles des galaxies.

(ou les lois de la gravitation sont fausses)

(On remarque qu'on mentionne qu'il se pourrait que les lois de la gravitation soient fausses. On se rappelle qu'on obtient cette masse trop grande à partir de la loi de la gravitation. Peut-être qu'on pourrait obtenir une masse plus près de la masse des étoiles si on modifiait les lois de la gravitation. C'est une possibilité que plusieurs physiciens explorent en ce moment.)

Notez que, pour les galaxies spirales, la proportion de matière sombre est plus grande pour les galaxies de types SAa et SBa et plus petite pour les galaxies de type SAc et SBc. Il est possible que cette différence soit à l'origine des différences entre les types SAa/SBa, SAb/SBb et SAc/SBc.

Pour l'instant, nous ne donnerons aucun indice sur la nature de cette masse. Nous aurons d'autres indices dans d'autres chapitres. La seule chose qu'on peut connaître, c'est la distribution de cette matière sombre.

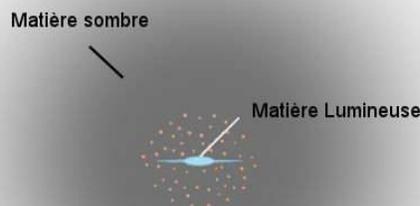


On se rappelle que la vitesse de rotation est pratiquement constante dans tout le disque des galaxies spirales, peu importe la distance du centre de la galaxie (courbe B).

Ce n'est pas ce qu'on obtiendrait s'il n'y avait que des étoiles. Selon la distribution des étoiles dans la galaxie, cette vitesse devrait diminuer avec la distance (courbe A).

www.e-education.psu.edu/astro801/content/18_p8.html

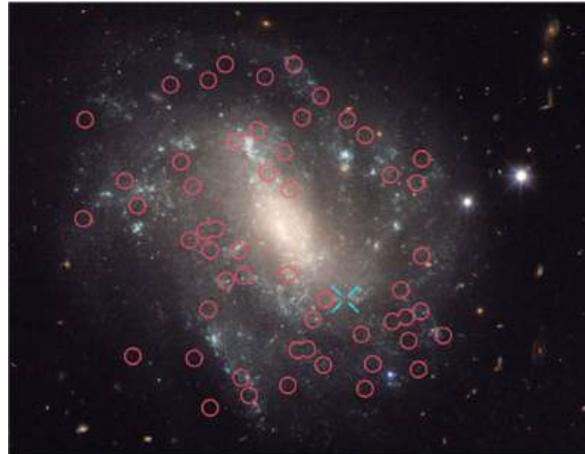
L'écart entre les deux est dû à la matière sombre. Sachant que la vitesse de rotation se stabilise ainsi à une certaine valeur, on peut déduire la distribution de matière sombre dans la galaxie. Les calculs montrent que la matière sombre serait répartie partout autour de la galaxie avec une densité qui diminue à mesure qu'on s'éloigne. La figure suivante illustre cette baisse de densité avec la distance.



Notez que les simulations montrent que la présence de matière noire aussi est nécessaire pour stabiliser la structure spirale. Sans matière noire, la structure spirale se perd au bout de quelques rotations.

12.10 LA DISTANCE DES GALAXIES

On détermine souvent la distance d'une galaxie par l'observation de céphéides ou de supernovas de type Ia dans cette galaxie. Il y a quand même de nombreuses céphéides dans les galaxies. Cette image montre la position de plusieurs céphéides (ronds rouges) et d'une supernova de type Ia (croix bleue) dans la galaxie UGC 9391.

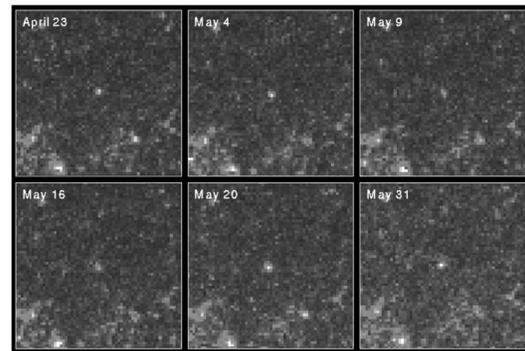


apod.nasa.gov/apod/ap160606.html

Les céphéides

L'image de droite nous montre une céphéide dans la galaxie M100. On peut y voir la variation d'éclat de cette céphéide en 1994.

Avec la période de la céphéide, on peut déterminer la luminosité moyenne de l'étoile. Puis, avec la magnitude de l'étoile vue de la Terre, on peut calculer la distance de la galaxie.



messier.seds.org/more/m100_hst2.html

La limite de cette méthode se situe aux environs de 100 millions d'années-lumière. Au-delà de cette distance, on ne peut plus voir les céphéides.

Les supernovas de type Ia

On peut aussi mesurer la distance d'une galaxie si on observe une supernova de type Ia dans la galaxie. Ces explosions de naine blanche se produisent toujours dans les mêmes conditions et ont presque toujours la même luminosité. Avec cette luminosité et l'intensité de la lumière reçue, on peut trouver sa distance et donc la distance de la galaxie.

Les supernovas de type Ia étant beaucoup plus brillantes que les céphéides, elles permettent de déterminer des distances plus grandes que celles obtenues par la méthode des céphéides. Avec les supernovas, on peut mesurer des distances allant jusqu'à une dizaine de milliards d'années-lumière environ. Au-delà de cette distance, on ne peut plus voir les supernovas. Les supernovas sont cependant relativement rares dans une galaxie et il faut donc être un peu chanceux pour trouver une supernova dans une galaxie.

La relation de Tully-Fisher

On a vu que la vitesse de rotation des étoiles autour du centre d'une galaxie spirale est pratiquement la même partout dans le disque. Durant les années 70, les astronomes ont trouvé qu'il y avait une bonne corrélation entre la luminosité des galaxies spirales et la vitesse de rotation maximale de la matière dans le disque de celles-ci. C'est la relation de Tully-Fisher. Cela n'est pas très étonnant. Une vitesse de rotation plus grande signifie que la masse de la galaxie est plus importante, ce qui devrait donner une luminosité plus grande puisqu'il y a plus d'étoiles.

On mesure donc la vitesse de rotation de la galaxie, puis, à partir de relation de Tully-Fisher, on détermine la luminosité de la galaxie. Finalement, avec la luminosité et l'intensité de la lumière reçue, on peut calculer la distance de la galaxie.

Cette méthode fonctionne bien jusqu'à près de 650 millions d'années-lumière. Au-delà de cette distance, les mesures de la vitesse de rotation sont trop difficiles.

12.11 LES GALAXIES EN INTERACTION

Les collisions entre galaxies sont des événements assez courants dans l'univers. Environ 2 % des galaxies sont en interaction d'une façon ou d'une autre avec une galaxie voisine. On connaît de nombreux exemples de galaxies en interaction, dont celui montré sur l'image de droite. Il s'agit d'une interaction entre les galaxies NGC 4038 (à droite) et NGC 4039 (à gauche).



en.wikipedia.org/wiki/File:Antennae_galaxies_xl.jpg

Très peu d'étoiles des galaxies vont entrer en contact lors de ces collisions. La distance entre les étoiles par rapport à leur taille laisse amplement de place pour que les étoiles puissent passer l'une à côté de l'autre sans qu'il y ait de contact. Si jamais elles entrent en contact par une chance incroyable, elles fusionneront pour former une seule étoile plus massive. (Cela semble se produire au centre de certains amas globulaires. Dans ces amas très âgés, il ne devrait plus y avoir d'étoiles ayant des masses supérieures à $1 M_{\odot}$ puisqu'il n'y a pas de gaz dans ces amas qui pourrait former de nouvelles étoiles. Pourtant, on observe quelques étoiles ayant des masses supérieures. Ces étoiles, appelées *blue stragglers* (trainardes bleues... disons), seraient le résultat de la fusion d'étoiles lors de collisions.)

C'est bien différent pour les gaz présents dans les galaxies. La collision entre les nuages de gaz provoque leur contraction, ce qui entraîne bien souvent l'effondrement gravitationnel du nuage et la formation d'étoiles. On peut d'ailleurs voir sur l'image de la collision entre NGC 4038 et NGC 4039 toute une série de nuages d'hydrogène ionisé (en rosé) générés par la naissance d'étoiles très massives. Il arrive donc très souvent que les collisions provoquent une flambée de formation d'étoile dans les galaxies. On obtient alors des *galaxies* « *starburst* », que l'on pourrait traduire par *galaxie à sursaut de formation d'étoile*.

Les galaxies ne passeront pas simplement l'une à travers l'autre pour se séparer par la suite. L'interaction gravitationnelle entre les deux galaxies va les amener à fusionner pour former une nouvelle galaxie plus massive. L'interaction gravitationnelle entre toutes les composantes des deux galaxies est très complexe. Elle déformera les deux galaxies et il y aura souvent des étoiles et du gaz éjectés.

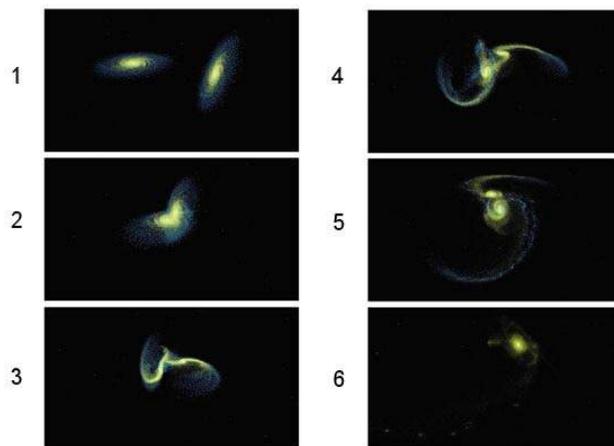
On peut voir ces éjections de matière dans le cas de la collision entre NGC 4038 et 4039 si on prend une image un peu moins zoomée (figure de droite). On peut alors voir deux grands ponts de matière éjectée qui font qu'on donne le nom de *les antennes* à ce système.



cseligman.com/text/atlas/ngc40.htm

Dans une région de l'univers où la densité de galaxie est plus grande et les collisions plus fréquentes (l'amas de la Vierge, qu'on verra plus loin), on estime que 10 % à 30 % des étoiles des galaxies ont ainsi été éjectées et ne font plus partie d'aucune galaxie.

On a fait de nombreuses simulations de collision sur ordinateur pour voir comment les galaxies se déforment lors de collisions. Voici à quoi ressemble le résultat de ces simulations.



boojum.as.arizona.edu/~jill/NS102_2006/Lectures/GalaxyEvolution/galaxyevol.html

Le film suivant nous montre une simulation de la fusion de galaxies lors d'une telle collision.

<https://www.youtube.com/watch?v=Lru7Fod1Evg>

On pourrait même avoir une collision de plusieurs galaxies en même temps.

<https://www.youtube.com/watch?v=wyS1eHXe75U>

Évidemment, la structure d'une galaxie spirale est complètement détruite lors d'une collision avec une autre galaxie de taille comparable. On obtient alors des étoiles tournant dans toutes les directions et ayant toutes les orientations possibles.

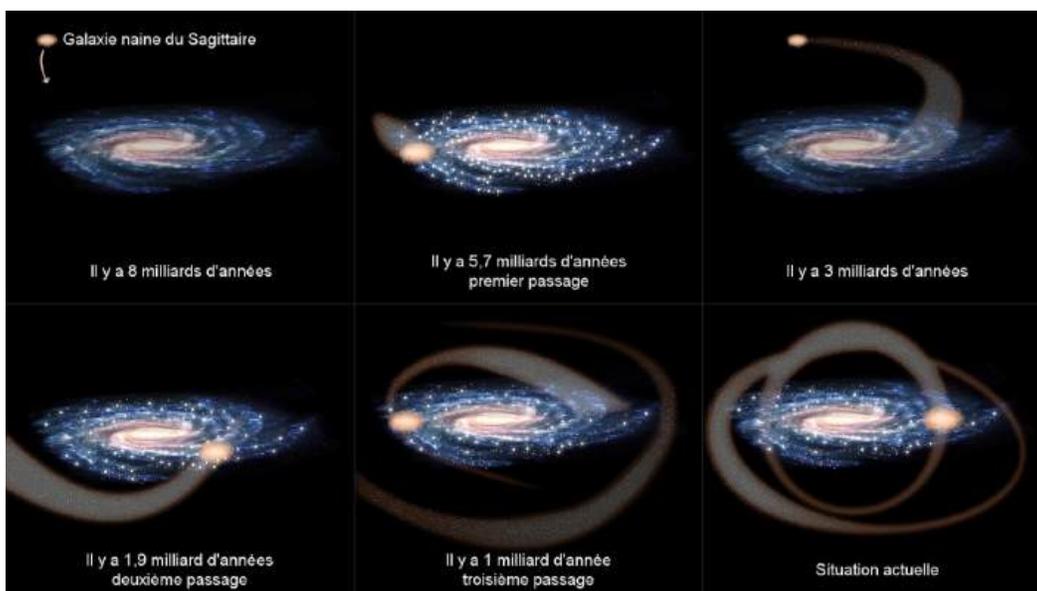
Si la collision se fait entre une grande galaxie spirale et une petite galaxie, la grande galaxie va absorber la petite galaxie tout en gardant sa structure, mais il est possible que la collision induise une certaine torsion dans le plan de la galaxie. Ce genre de torsion est assez commun puisque 50 % des galaxies spirales ont des torsions plus ou moins prononcées. On peut voir une telle torsion dans cette galaxie.



apod.nasa.gov/apod/ap120304.html

Évidemment, la Voie lactée n'a pas été épargnée par les collisions avec d'autres galaxies. Les mesures très précises de position d'étoiles et de spectres permettent de déterminer assez précisément les trajectoires et la composition chimique des étoiles pour qu'on puisse déterminer que certaines proviennent d'une autre galaxie assez importante (une galaxie ayant le quart de la masse de la Voie lactée et que les chercheurs ont nommé Gaia-Enceladus) qui est entrée en collision avec la Voie lactée il y a 10 milliards d'années. Cette collision a fait en sorte qu'il y a certaines étoiles assez près du Soleil aujourd'hui qui ont des compositions chimiques un peu différentes et qui tournent autour du centre galactique dans la direction inverse de celle du Soleil.

En ce moment même, la Voie lactée est en train de faire une collision avec une galaxie beaucoup plus petite appelée la *galaxie naine du Sagittaire*. Il semblerait (ce n'est pas certain) que cette galaxie naine aurait traversé le disque de la Voie lactée pour la première fois il y a 5,7 milliards d'années pour retraverser le disque il y a 1,9 milliard d'années et une autre fois il y a un milliard d'années.



www.numerama.com/sciences/626838-a-la-rencontre-de-larchitecte-de-la-voie-lactee.html#pid=3

Il se pourrait que la naissance du Soleil soit liée aux perturbations générées par ce premier passage. Sa trajectoire l'amènera à traverser à nouveau le disque dans 100 millions d'années (de l'autre côté de la galaxie par rapport à notre position). La Voie lactée est peu perturbée par ces passages alors que la galaxie naine est déjà passablement déformée puisqu'elle laisse de longues trainées d'étoiles sur sa trajectoire. Ultiment, elle sera complètement absorbée par la Voie lactée.

Mais la plus importante collision entre la Voie lactée et une autre galaxie se produira dans le futur puisque la galaxie d'Andromède s'approche de nous à 300 km/s. Il devrait donc y avoir une gigantesque collision entre la Voie lactée et la galaxie d'Andromède dans 4 milliards d'années.

<https://www.youtube.com/watch?v=PrIk6dKcdoU>

12.12 LA FORMATION DES GALAXIES

Les galaxies spirales

Les galaxies ont commencé à se former il y a environ 12 milliards d'années par l'effondrement gravitationnel de l'hydrogène et de l'hélium de l'univers, alors réparti presque uniformément dans l'univers. Cette formation ressemble beaucoup à la formation du système solaire parce que la contraction gravitationnelle du gaz a, par la conservation du moment cinétique, fait lentement augmenter la rotation du gaz, pour finalement former un disque. À la fin de ce processus, on obtient une galaxie spirale.



boojum.as.arizona.edu/~jill/NS102_2006/Lectures/GalaxyEvolution/galaxyevol.html

Pendant tous les stades de la vie de la galaxie, il peut se former des étoiles. Les premières étoiles se forment déjà quand le nuage de la galaxie est encore très grand, comme sur la première image de la figure précédente. Cela nous donne des étoiles qui sont en dehors du disque de la galaxie. Nous avons vu qu'il y a effectivement des étoiles dans cette région, appelée le halo. Elles se regroupent souvent en amas globulaire et ce sont des étoiles très vieilles, ce qui est conforme à l'idée que ces étoiles se soient formées très tôt dans la vie de la galaxie. Aujourd'hui, il ne se forme plus d'étoiles dans le halo parce que le gaz s'est concentré dans le disque.

La formation de la galaxie est un processus assez complexe qu'on a simulé sur ordinateur. Voici le genre de résultats obtenus.

https://www.youtube.com/watch?v=MncUDWhPB_E

On remarque premièrement les très nombreuses petites galaxies qui sont assimilées par la galaxie spirale, un processus qui se poursuit encore aujourd'hui.

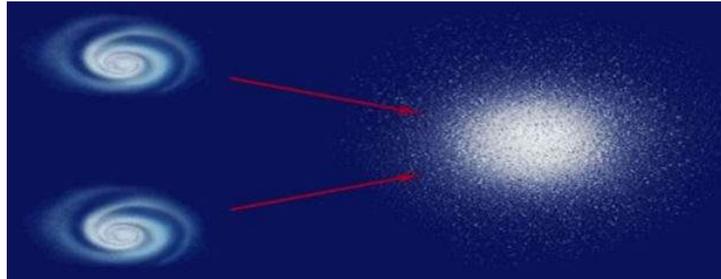
Remarquez également comment le bulbe de la galaxie oscille entre une forme presque sphérique (galaxie spirale) et une forme plus ou moins allongée (galaxie spirale barrée), ce qui tend à confirmer notre idée qu'il n'y a pas de différence majeure entre les galaxies spirales et les galaxies spirales barrées puisque la galaxie oscille entre ces deux variantes. On remarque aussi que la phase de spirale barrée est de plus en plus longue, ce qui est conforme au fait que la proportion des spirales barrées est plus importante (environ 70 %) dans notre voisinage immédiat. (N'oubliez pas qu'on voit les galaxies éloignées telles qu'elles étaient dans le passé et il faut donc regarder uniquement les galaxies assez près de nous pour avoir une idée de la structure des galaxies en ce moment.)

Les galaxies irrégulières

Si la masse du nuage de gaz initial est plus petite que 1 milliard à 10 milliards de masses solaires, il n'y aura pas de structure spirale et on obtient plutôt une galaxie irrégulière.

Les galaxies elliptiques

On pense que les galaxies elliptiques sont le résultat de la collision de deux galaxies spirales importantes. En effet, la collision provoquerait la formation de nombreuses étoiles, éliminant une bonne partie du gaz de la galaxie. On se retrouve donc avec une nouvelle galaxie dénuée de gaz dans laquelle les étoiles se déplacent dans toutes les directions, comme dans une galaxie elliptique.



www.cfa.harvard.edu/~ejchaisson/cosmic_evolution/docs/fr_1/fr_1_gal7.html

Notez toutefois qu'on observe parfois des galaxies elliptiques dans des régions où la faible densité de galaxie n'est pas très propice aux collisions. Il semble donc que certaines galaxies elliptiques auraient pu naître par un processus différent de celui évoqué ici.

Observations de l'univers plus jeune

Ces scénarios de formation semblent confirmés par les observations de galaxies lointaines. En observant des galaxies à plusieurs milliards d'années-lumière, on voit l'univers tel qu'il était il y a plusieurs milliards d'années. Cela nous permet de voir comment était l'univers autrefois.

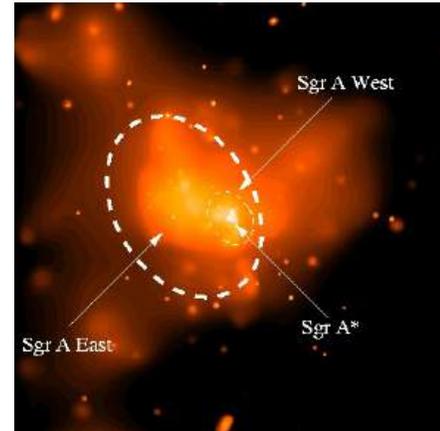
On remarque en effet que les galaxies d'autrefois étaient plus petites et que la densité de galaxies était plus grande. Les galaxies sont devenues plus grandes en fusionnant, ce qui a également fait diminuer la densité de galaxie en diminuant leur nombre.

12.13 LES TROUS NOIRS GALACTIQUES

Sagittarius A*

Vu de la Terre, le centre de la galaxie se trouve dans la constellation du Sagittaire. En lumière visible, on ne voit pas le centre puisqu'il est caché par la poussière, mais on peut le voir avec d'autres longueurs d'onde, comme les ondes radio par exemple.

En ondes radio, il y a 4 sources radio, appelées *Sagittarius A*, *B*, *C* et *D*. La plus puissante de ces sources, *Sagittarius A*, est elle-même une source triple. Il y en a une qui est une ancienne supernova (*Sgr A East*) et une autre est une région d'hydrogène ionisé (*Sgr A West*). La 3^e source, appelée *Sagittarius A**, est une source d'ondes radio très compacte. Vous avez, à droite, une image en rayon X, très zoomée, de cet objet.



www.e-education.psu.edu/astro801/content/l8_p7.html

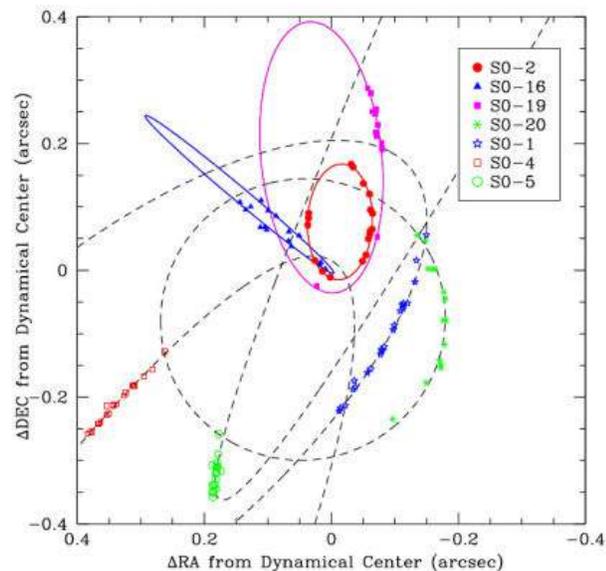
On sait aussi que cette source est très compacte. Elle doit être, au maximum, de la taille de l'orbite de Saturne. Il y a très peu d'objets aussi compacts pouvant émettre autant d'énergie que Sagittarius A*. Certains ont alors suggéré qu'il y a peut-être un trou noir au centre de la galaxie. (En fait, cette idée avait été suggérée en 1971, avant même qu'on découvre Sagittarius A* en 1974.)

Mouvement des étoiles près de Sagittarius A*

En étudiant le mouvement des quelques dizaines d'étoiles au centre de la galaxie à l'aide d'image en infrarouge, il constate que ces étoiles tournent autour d'un objet très massif au centre de la galaxie.

L'étude de ces orbites d'étoiles permet de déduire que l'objet au centre de ces orbites a une masse de 4,2 millions de masses solaires.

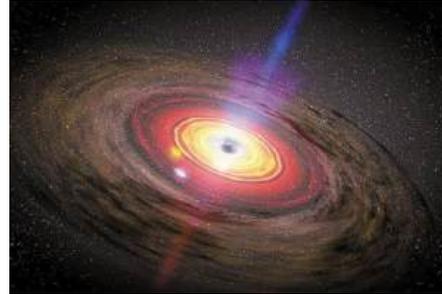
Le seul objet pouvant avoir une telle masse et être aussi compact est un **trou noir de 4,2 millions de masses solaires**. On a affaire à un *trou noir supermassif*.



www.ifa.hawaii.edu/~barnes/ast110_06/bhaq.html

Le trou noir central

Ce n'est pas le trou noir qui émet directement le rayonnement en rayons X observé, c'est plutôt la matière qui tombe dans ce trou noir. Avant de traverser l'horizon, la matière s'engouffre dans le trou noir en formant un disque d'accrétion autour du trou noir.



www.daviddarling.info/encyclopedia/B/blackhole.html

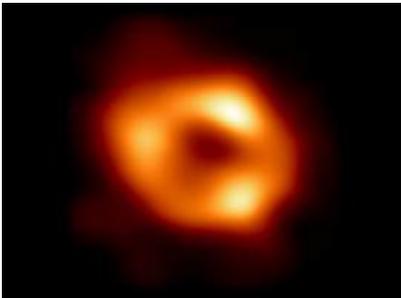
À mesure que la matière s'approche du trou noir, elle perd de plus en plus d'énergie gravitationnelle. Une partie de cette énergie va en énergie cinétique puisque la matière tourne de plus en plus vite autour du trou noir, mais une autre partie va en chaleur. Ainsi, la matière en orbite autour du trou noir devient très chaude en s'approchant de l'horizon. La température du disque d'accrétion est beaucoup plus basse que pour un trou noir stellaire. Pour un trou noir de 4,2 millions de masses solaires, la température est aux environs de 80 000 K. À cette température, le maximum d'émission est à 37 nm, donc dans l'ultraviolet pas trop loin du visible.

On estime qu'il tombe environ une masse terrestre par année dans le trou noir au centre de la Voie lactée. En 2015, on suivait un nuage de gaz qui passait assez près (260 UA), mais il ne se passa pas grand-chose. Par contre, il y a parfois des augmentations rapides de l'intensité des rayons X. Par exemple, le 14 septembre 2013, l'intensité des rayons X devint 400 fois plus forte. Il y a probablement eu quelque chose qui a été englouti par le trou noir à ce moment, mais on ne sait pas trop quoi encore (peut-être un astéroïde).

Remarquez qu'avec un trou noir très massif comme celui au centre de la Voie lactée, il est possible de traverser l'horizon avant d'être spaghettifié par les forces de marée. En effet, l'horizon du trou noir central de la Voie lactée de 12 400 000 km (si on suppose qu'il n'a pas de rotation) alors qu'un astronaute commencerait à souffrir à environ 300 000 km de la singularité.

La durée de vie maximale à l'intérieur de l'horizon de ce trou noir est de 65 s. Comme le temps entre le moment où l'astronaute commence à souffrir et l'arrivée à la singularité est d'environ 0,2 s, l'astronaute se sentirait relativement bien pendant presque tout son mouvement à l'intérieur de l'horizon.

Si le trou noir tourne sur lui-même, l'astronaute peut être en orbite à l'intérieur de l'horizon de Cauchy sans que les forces de marées rendent la situation inconfortable.



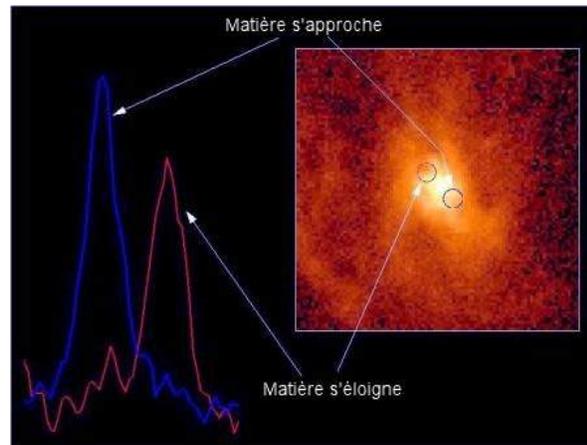
On a même réussi à faire une image du trou noir central de la Voie lactée en 2022. La zone brillante est le disque d'accrétion (dont l'image est déformée par la déviation de la lumière). Le disque d'accrétion est environ de la taille de l'orbite de Mercure.

fr.wikipedia.org/wiki/Sagittarius_A*

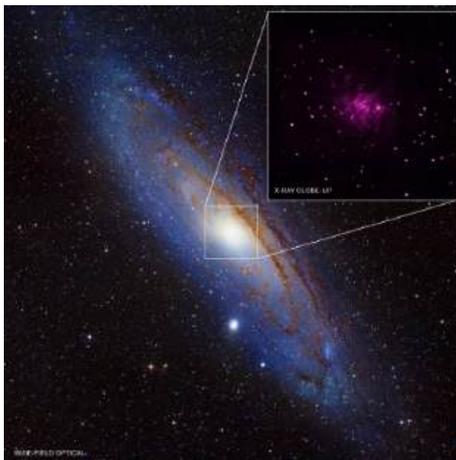
Il y aurait un trou noir central dans toutes les galaxies spirales et elliptiques

Les mesures réalisées sur les autres galaxies semblent indiquer qu'il y a très souvent un trou noir très massif au centre de la galaxie. On donne le nom de *trou noir supermassif* aux trous noirs au centre des galaxies.

Une des techniques utilisées pour détecter ces trous noirs consiste à mesurer la vitesse de rotation des objets au centre de la galaxie par effet Doppler. Avec la vitesse de rotation de la matière au centre de la galaxie, on peut déduire la masse du trou noir.



www.ifa.hawaii.edu/~barnes/ast110_06/bhaq.html

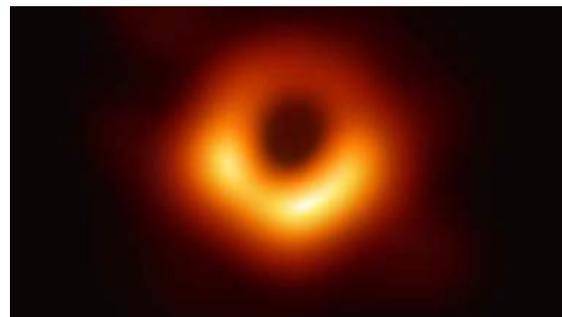


Ainsi, on a déterminé que la galaxie d'Andromède possède aussi son trou noir. On peut le voir sur cette image du satellite Chandra, un télescope en orbite conçu pour observer en rayons X.

Le trou noir d'Andromède a une masse se situant entre 110 et 230 millions de masses solaires. Il est donc environ 40 fois plus massif que celui au centre de notre galaxie.

scitechdaily.com/chandra-data-reveals-26-new-black-hole-candidates-in-m31/

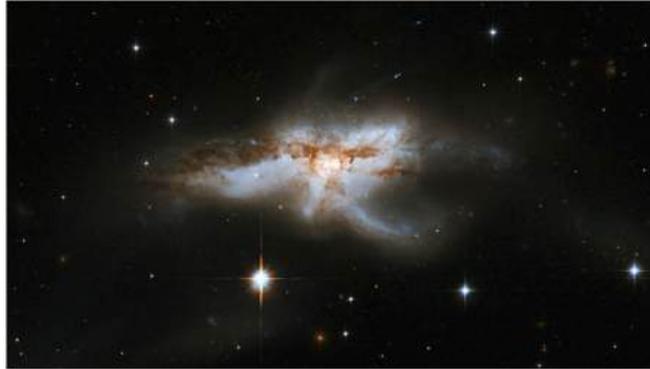
Ce n'est pas le trou noir le plus massif connu. Celui au centre de la galaxie elliptique géante M87 a une masse se situant entre 5,9 milliards et 6,9 milliards de masses solaires ! Voici une image du trou noir de M87. Le côté plus lumineux correspond au côté du disque qui se dirige vers nous avec une vitesse très élevée.



www.asc-csa.gc.ca/fra/astonomie/fiches-information/trous-noirs.asp

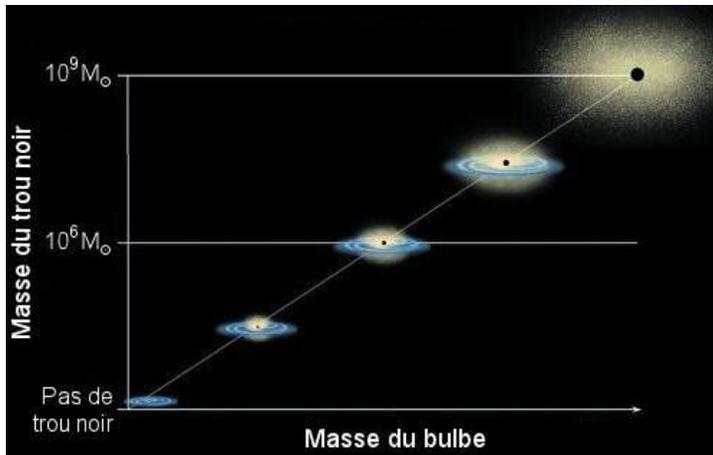
Le plus massif connu en ce moment (avec une certaine incertitude) est le trou noir au centre de SDSS J123132.37+013814.1 dont la masse est d'environ 112 milliards de masses solaires. Cette galaxie est aussi une galaxie elliptique géante. Selon les modèles, la limite théorique serait de 270 milliards de masses solaires.

Il n'est pas tellement étonnant de retrouver les trous noirs les plus massifs au centre des galaxies elliptiques géantes. Si ces galaxies sont le résultat de la fusion de deux ou même plusieurs galaxies spirales, on doit s'attendre à ce que les trous noirs centraux finissent par fusionner pour former un trou noir encore plus massif. On peut même observer parfois deux trous noirs en orbite l'un autour de l'autre dans certaines galaxies comme NGC 6240 (figure), résultat de la fusion de 2 galaxies. Peut-être que la fusion des trous noirs se fera un jour.



en.wikipedia.org/wiki/NGC_6240

La fusion de galaxies perturbe aussi la trajectoire des étoiles, ce qui peut dévier certaines étoiles et les diriger vers le ou les trous noirs centraux. La masse des étoiles entrant en collision avec le trou noir viendra alors s'ajouter à la masse du trou noir, ce qui contribue à la formation de trou noir supermassif.



www.ifa.hawaii.edu/~barnes/ast110_06/bhaq.html

Il semble qu'il y ait un lien entre la masse du trou noir et la masse du bulbe de la galaxie. La masse du trou noir central correspondrait environ à 0,1 % de la masse du bulbe (en considérant que les galaxies elliptiques sont simplement un bulbe).

En tout cas, cette idée s'accorde bien avec ce qu'on observe avec la galaxie du Sombrero (M 104, NGC 4594), dont le bulbe est anormalement gros. Au centre de cette galaxie, on retrouve un des plus gros trous noirs connus, dont la masse est de près de 1 milliard de masses solaires.

fr.wikipedia.org/wiki/M104



Il n'est pas certain qu'il y ait un trou noir central dans les galaxies de faible masse (qui serait alors des galaxies irrégulières). Certains modèles prévoient qu'il doit y avoir un trou noir dans toutes les galaxies, mais d'autres modèles prédisent l'existence de galaxies de faible masse sans trou noir central.

L'origine de ces trous noirs est énigmatique pour le moment. On observe des galaxies si éloignées de nous qu'on les voit telles qu'elles étaient quand l'univers avait seulement 1 milliard d'années. Même si jeune, elle semble déjà posséder un trou noir supermassif. On ne voit pas très bien comment de tels trous noirs auraient pu se former si rapidement.

12.14 LES GALAXIES ACTIVES

Certaines galaxies produisent un rayonnement particulier. Certaines émettent des ondes particulières, comme les ondes radio, et d'autres ont un noyau anormalement brillant. Ce sont les galaxies actives.

Les types de galaxies actives

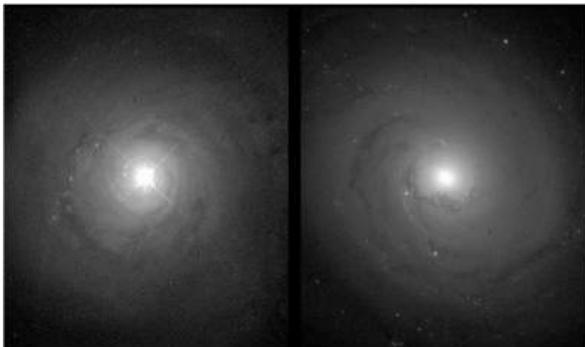
Les galaxies de Seyfert

En 1908, Edward Fath commence une étude des spectres des « nébuleuses spirales ». (C'était en fait des galaxies, mais on ne le savait pas encore.) Il découvre alors que la galaxie M77 (NGC 1068), une spirale barrée située à 47 millions d'années-lumière, est un peu particulière (figure de droite.) Alors qu'on retrouve normalement uniquement des raies d'absorption dans le spectre du noyau d'une galaxie, il observe qu'il y a des raies d'émission brillantes dans le spectre du noyau de cette galaxie. De plus, il constate que le noyau de la galaxie est un peu plus brillant que ce qu'on observe normalement pour ce type de galaxie.



[fr.wikipedia.org/wiki/M77_\(galaxie_spirale\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/M77_(galaxie_spirale))

En 1926, Edwin Hubble découvre deux autres galaxies de ce type (NGC 4051 et NGC 4151). Carl Seyfert en découvre 9 autres, ce qui lui permet d'affirmer en 1943 qu'un petit pourcentage des galaxies possède un tel noyau anormalement brillant et de fortes raies d'émission dans le spectre de leur noyau. Ce sont les *galaxies de Seyfert*.



L'image de gauche nous montre une galaxie de Seyfert (NGC 5548 à gauche) et une galaxie normale (NGC 3377 à droite).

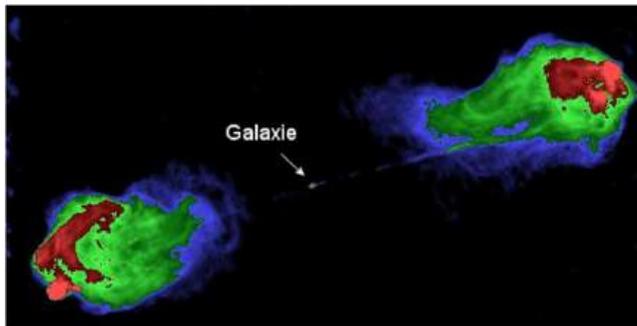
(En réalité, il y a toute une variété de types de galaxie de Seyfert selon la largeur des raies d'émission, mais nous laisserons tomber la distinction entre ces types ici.)

www.star.le.ac.uk/~sav2/blackholes/quasars.html

La luminosité du noyau des galaxies de Seyfert est de l'ordre de 10^{37} W à 10^{38} W, soit environ la même que celle de tout le reste de la galaxie (rappelons-nous que la luminosité de toute la Voie lactée est environ de 7×10^{36} W).

Les radiogalaxies

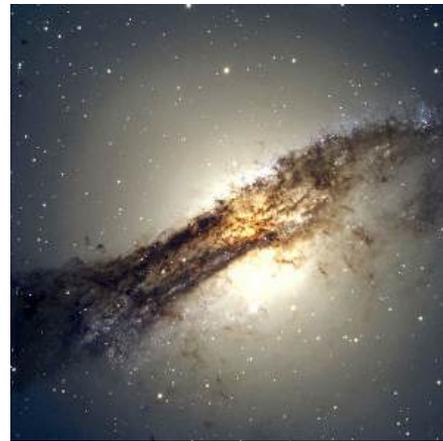
La galaxie Cygnus A, distante de 600 millions d'années-lumière, est déjà un peu particulière en visible (figure de droite). Elle ne semble ni elliptique ni spirale, bien qu'on distingue la présence de poussière. En fait, Cygnus A ressemble à une collision de galaxies.



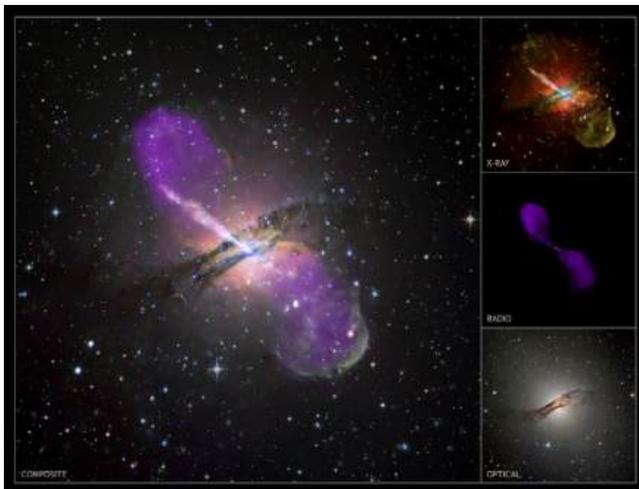
en.wikipedia.org/wiki/Cygnus_A

En 1952, Walter Baade et Rudolf Minkowski découvrent qu'elle émet des ondes radio. C'est même la source d'ondes radio la plus puissante du ciel pour un objet à l'extérieur de la Voie lactée. L'année suivante, on se rend compte qu'il y a en réalité deux sources d'onde radio, situées de chaque côté de la galaxie.

La galaxie Centaurus A (image de droite) est aussi une galaxie de ce genre, quoique l'émission d'onde radio est moins intense. Étant plus près (10 à 16 millions d'années-lumière), on peut mieux distinguer les détails de la structure de la galaxie. En visible, elle ressemble à une galaxie elliptique, mais avec de la poussière.



fr.wikipedia.org/wiki/Centaurus_A



En radio, on distingue aussi deux lobes d'émission de chaque côté de la galaxie. Cette image à gauche est une superposition d'une image en visible, d'une image obtenue en ondes radio et d'une image en rayon X de la galaxie.

apod.nasa.gov/apod/ap080110.html

La puissance émise par les radiogalaxies est assez importante. Les plus puissantes peuvent atteindre 10^{38} W, soit près de 10 fois la luminosité de la Voie lactée.

Les quasars et les QSO

Durant les années 50, on découvre plusieurs sources radio ne correspondant à aucun objet visible dans le ciel. En 1960, Allan Sandage et Thomas Matthews parviennent finalement à trouver un objet visible de magnitude 16 à l'endroit où se situe une de ces sources radio, la source nommée 3C 48 (le 48^e objet du 3^e catalogue de Cambridge). Comme l'objet était minuscule et ressemblait à une étoile bleue, on donna le nom de *quasar* à ces objets, pour *quasi stellar radio source*. Un peu plus tard, on découvre qu'il y a des objets ayant les mêmes caractéristiques que les quasars, mais sans émissions radio. Qu'ils émettent des ondes radio ou non, ces objets sont des QSO, ce qui signifie *quasi stellar object*. Les QSO qui émettent des ondes radio font partie de la sous-catégorie des quasars. On connaît actuellement environ 200 000 QSO, dont seulement 10 % sont des quasars.

Pendant un certain temps, il y a un débat concernant la distance des QSO, mais les indices montrant qu'ils sont très loin de la Terre s'accumulent. Lentement, on découvre que les QSO sont situés au centre de galaxies qui sont typiquement à quelques milliards d'années-lumière de la Terre. Cette image montre la galaxie associée au QSO 1229+204, un des plus près de nous à 914 millions d'années-lumière. (Au départ, on ne voyait que la source brillante au centre de ces galaxies et les QSO ressemblaient alors à une étoile, d'où les appellations *quasi stellar*.)



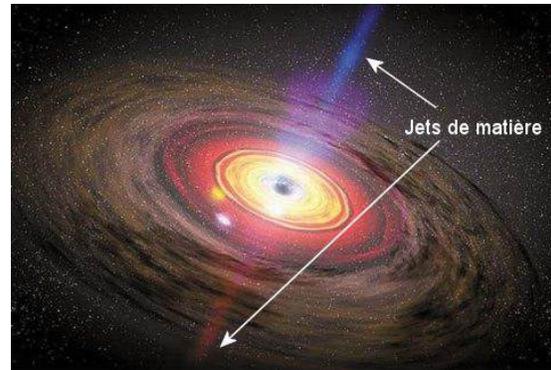
www.spacetelescope.org/images/opo9416a/

Puisqu'ils sont si loin de la Terre, les QSO doivent avoir une luminosité formidable, de l'ordre de 10^{38} W à 10^{42} W, pour que le rayonnement reçu sur la Terre corresponde à celui observé, en supposant que la source est isotrope (une source qui émet la même quantité de rayonnement dans toutes les directions). C'est une très grande luminosité (environ 10 à 100 000 fois la luminosité de la Voie lactée). La source du rayonnement doit également être de petite taille puisque l'intensité de la source peut varier aussi rapidement qu'en une journée. Ces variations rapides indiquent que la source a une taille comparable à celle du Système solaire. L'image du QSO 1229+204 montre bien formidable luminosité de cette petite source au centre de la galaxie par rapport au reste de la galaxie.

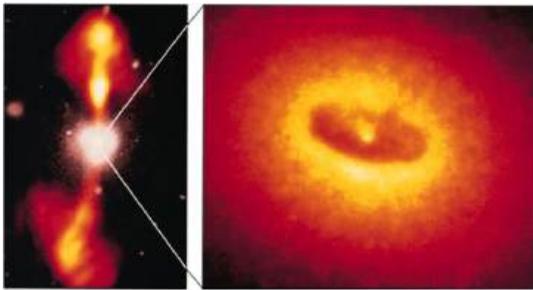
Le trou noir central et les jets de matière

En 1964, Edwin Salpeter, Donald Lynden-Bell et Yakov Zeldovich proposent un modèle qui explique comment les galaxies actives produisent le rayonnement qu'elles émettent. Selon eux, un trou noir supermassif au centre de la galaxie serait à l'origine du rayonnement intense émis par la galaxie. (À l'époque, on ne savait même pas s'il y avait vraiment un trou noir au centre des galaxies !)

Les galaxies actives sont celles qui ont un important disque d'accrétion autour du trou noir. C'est ce disque de matière très chaude qui est responsable de la très grande luminosité du noyau de la galaxie. Dans certaines conditions (qu'on ne connaît pas bien, mais qui impliquent des champs magnétiques), il se forme des jets de matière de chaque côté du disque d'accrétion.



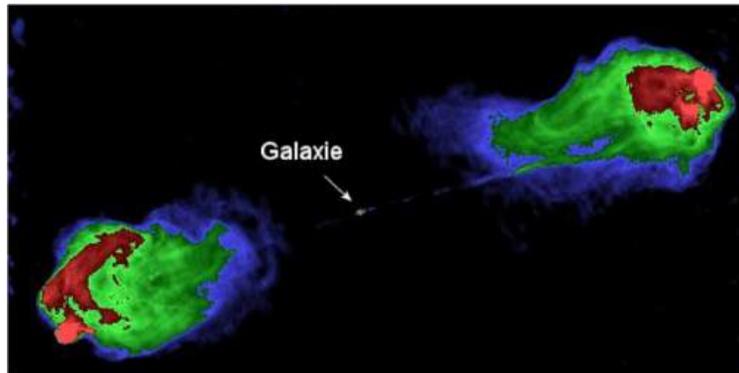
www.daviddarling.info/encyclopedia/B/blackhole.html



On peut d'ailleurs voir le disque d'accrétion et les jets formés par la galaxie active NGC 4261 sur cette image qui est une superposition d'images dans les domaines radio et visible.

en.wikipedia.org/wiki/NGC_4261

Ces jets de matière sont à l'origine des ondes radio émises par certaines galaxies actives. Ils sont formés de plasma éjecté à des vitesses généralement entre 1000 km/s et 100 000 km/s (certains jets ont même des vitesses assez près de celle de la lumière). Quand ce plasma est finalement arrêté par la matière intergalactique, le mouvement des particules chargées dans le champ magnétique entraîne l'émission d'ondes radio. Il se forme alors deux lobes d'ondes radio, un pour chaque jet.



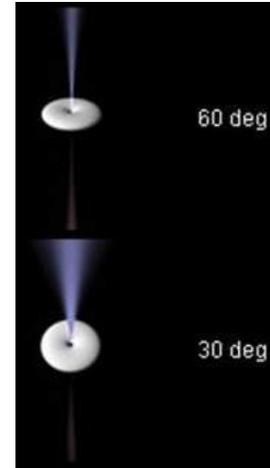
Dans le cas de Cygnus A, les jets parcourent 160 000 années-lumière avant d'être arrêtés.

Notez que les lobes radio sont presque toujours associés à des galaxies elliptiques. L'absence de gaz et de poussière dans ces galaxies permet au jet de sortir de la galaxie sans trop d'entraves. Dans une galaxie spirale, le gaz et la poussière bloquent le jet et l'empêchent d'aller former des lobes radio.

Une partie des rayons cosmiques reçus sur Terre provient des trous noirs galactiques actifs.

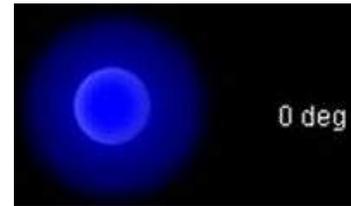
Des orientations particulières

Généralement, on verra le disque d'accrétion lumineux avec un certain angle. On voit ici le disque d'accrétion avec un angle de 60° et 30° . Dans ces cas, on voit bien le disque d'accrétion très lumineux, ce qui donne une très grande luminosité au noyau de la galaxie. On peut aussi voir les lobes radio s'il y a des jets.



Dans certains cas, on voit le disque d'accrétion par la tranche. Avec cette orientation, on ne voit pas beaucoup le disque d'accrétion. On peut cependant voir des lobes radio s'il y a des jets. Ainsi, on voit alors une galaxie dont le noyau semble tout à fait normal, mais qui possède des lobes radio.

Dans certains cas, on voit le disque directement du dessus. Dans cette configuration, on voit très bien le disque et la luminosité est très grande. S'il y a un jet, alors ce dernier est directement dirigé vers nous et cela donne un spectre très particulier au noyau de la galaxie. Quand cela se produit, on parle alors de *blazar*.



en.wikipedia.org/wiki/Active_galactic_nucleus

Pourquoi certaines galaxies sont-elles actives ?

Ce ne sont pas toutes les galaxies qui ont un noyau actif même si on pense qu'il y a un trou noir central au centre de pratiquement toutes les galaxies. Les galaxies sont actives seulement si le disque d'accrétion est important. Pour que cela se produise, il faut que beaucoup de matière tombe dans le trou noir. Pour une galaxie ayant plusieurs milliards d'années, comme la Voie lactée, le trou noir a « fait le ménage » dans son voisinage depuis longtemps et il n'absorbe presque plus de matière. Pour que la Voie lactée devienne active, il faudrait qu'il y ait un événement perturbateur qui amènerait de la nouvelle matière au trou noir.

Des interactions de galaxies

Un de ces événements peut être une interaction entre deux galaxies. Lors d'une telle interaction, la force de gravitation de l'autre galaxie perturbe le mouvement de la matière

dans la galaxie, ce qui amène de la matière vers le trou noir, et augmente l'activité de ce dernier. D'ailleurs, une proportion importante des galaxies actives sont des galaxies en interaction. Par exemple, la radiogalaxie Centaure A est une galaxie elliptique en train de dévorer une galaxie spirale. Cette fusion de galaxies amène de la matière vers le trou noir de la galaxie elliptique (et aussi celui de la galaxie spirale), le rendant actif.



Pour l'instant, le trou noir de notre galaxie est bien calme, mais la Voie lactée deviendra une galaxie active quand elle entrera en collision avec la galaxie d'Andromède dans 4 milliards d'années.

De jeunes galaxies

On peut aussi s'attendre à ce que les jeunes galaxies soient plus actives que les vieilles galaxies. Pendant les premiers milliards d'années de la vie de la galaxie, le trou noir central ramasse toute la matière qui s'approche trop près de lui pour faire le ménage autour de lui. La galaxie est donc active pendant un certain temps après sa formation.

De plus, les collisions entre galaxies étaient plus fréquentes il y a plusieurs milliards d'années. On verra plus tard que l'univers est en expansion, ce qui signifie que les galaxies étaient plus près les unes des autres dans le passé, augmentant ainsi les chances de collision. Cela est encore plus amplifié par le fait qu'il y avait plus de galaxies (forcément, puisque les fusions de galaxie font diminuer continuellement le nombre de galaxies).

Ainsi, quand on observe des galaxies à quelques milliards d'années-lumière, on les voit telles qu'elles étaient dans le passé. On voit donc des QSO, c'est-à-dire des galaxies très jeunes et très actives. Si on pouvait voir ces galaxies telles qu'elles sont en ce moment, elles seraient probablement inactives comme la Voie lactée, à moins d'être en interaction avec une autre galaxie.

Notre propre Voie lactée était fort probablement très active dans sa jeunesse. Peut-être qu'un astronome extraterrestre vivant à plusieurs milliards d'années-lumière voit en ce moment notre Voie lactée telle qu'elle était il y a plusieurs milliards d'années et se demande comment elle peut émettre autant d'énergie...

La quantité de matière qui tombe dans le trou noir

Le trou noir est actif s'il y a de la matière qui tombe dans le trou noir. Plus la quantité de matière qui tombe dans le trou noir chaque année est grande, plus le disque d'accrétion sera lumineux.

Le trou noir au centre de la Voie lactée n'absorbe que l'équivalent de la masse de la Terre chaque année et ce doit être un rythme typique pour les galaxies normales.

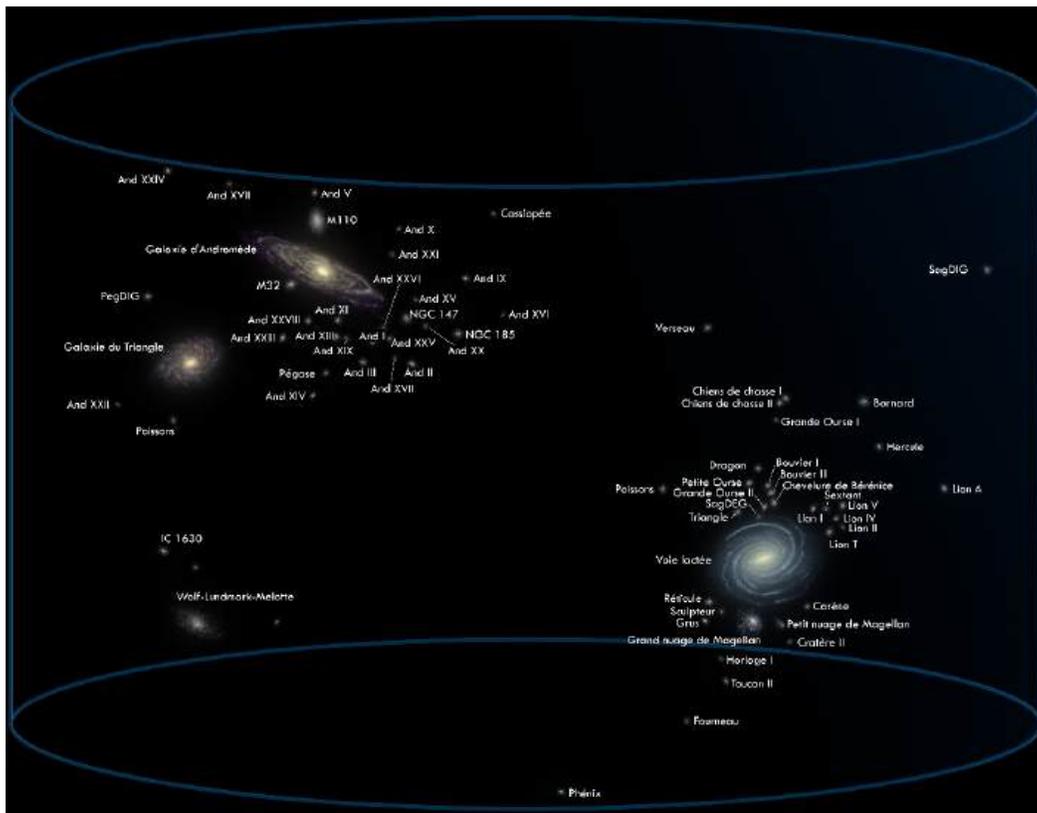
Les trous noirs au centre des galaxies actives récoltent beaucoup plus de matière chaque année. Évidemment, plus le trou noir absorbe de matière, plus la luminosité sera grande. Ainsi, les trous noirs des galaxies de Seyfert, qui sont un peu plus lumineuses que les galaxies normales, absorberaient environ $0,1 M_{\odot}$ par an pour avoir une puissance de 10^{38} W. Les trous noirs au centre des QSO seraient encore plus gourmands. Avec $10 M_{\odot}$ absorbées par le trou noir par an, on arrive à une luminosité de 10^{40} W. Les trous noirs centraux des QSO les plus lumineux absorbent jusqu'à $1000 M_{\odot}$ par an.

12.15 LES AMAS ET LES SUPERAMAS

Les galaxies ne sont pas distribuées aléatoirement dans l'univers, elles se regroupent plutôt en *groupes* ou en *amas*. On parle d'un groupe quand il y a moins de 100 galaxies importantes (environ) et on parle d'un amas quand il y a plus que 100 galaxies importantes.

Le groupe local

La Voie lactée et Andromède sont les deux plus grosses galaxies de notre groupe appelé le *groupe local*.



[commons.wikimedia.org/wiki/File:5_Local_Galactic_Group_\(ELitU\).png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:5_Local_Galactic_Group_(ELitU).png)

Sur cette image, la Voie lactée est la grosse galaxie de droite. Sur cette image, les cercles en haut et en bas ont un diamètre d'environ 4 Mal.

Le groupe local regroupe au moins 80 galaxies (peut-être plus, car la nature de quelques objets est encore incertaine). En plus de la Voie lactée et d'Andromède, notons la galaxie du triangle (M33, un peu à gauche et en bas d'Andromède) qui est la seule autre galaxie spirale de l'amas et la troisième plus grosse galaxie de l'amas. La masse de la galaxie du triangle est environ 25 fois plus petite que celle de la Voie lactée.



www.cieletespace.fr/image-du-jour/2697_spirales-dans-la-galaxie-du-triangle



Les autres galaxies de l'amas local sont beaucoup plus petites et ce sont souvent des galaxies irrégulières ou des galaxies naines irrégulières. Notons particulièrement les nuages de Magellan, facilement visibles à l'œil nu (mais pas au Québec).

fr.wikipedia.org/wiki/Nuages_de_Magellan

Le grand nuage de Magellan (à droite) a une masse $10^{10} M_{\odot}$, soit un peu moins de 1 % de celle de la Voie lactée, et il est situé à 163 000 années-lumière de la Terre. Même avec une masse si petite, le grand nuage de Magellan est la 4^e plus grosse galaxie du groupe local. Techniquement, le grand nuage de Magellan n'est pas une galaxie irrégulière, mais une galaxie de type Sm, ce qui signifie que c'est une galaxie spirale de type magellanique.



sguisard.astrosurf.com/Pagim/LMC-STL-135mm_V1.html

Dans le grand nuage de Magellan, on retrouve (un peu à droite du centre sur l'image), un nuage d'hydrogène ionisé. Cette nébuleuse, appelée la *nébuleuse de la tarentule*, est une des régions de formation d'étoile la plus active connues.

Le petit nuage de Magellan est un peu plus loin (197 000 al) et un peu moins massif que le grand nuage de Magellan ($7 \times 10^9 M_{\odot}$). (Attention, sur cette image on retrouve aussi deux amas globulaires (à gauche et un autre plus petit en bas) qui sont beaucoup plus près de nous que le petit nuage de Magellan.)



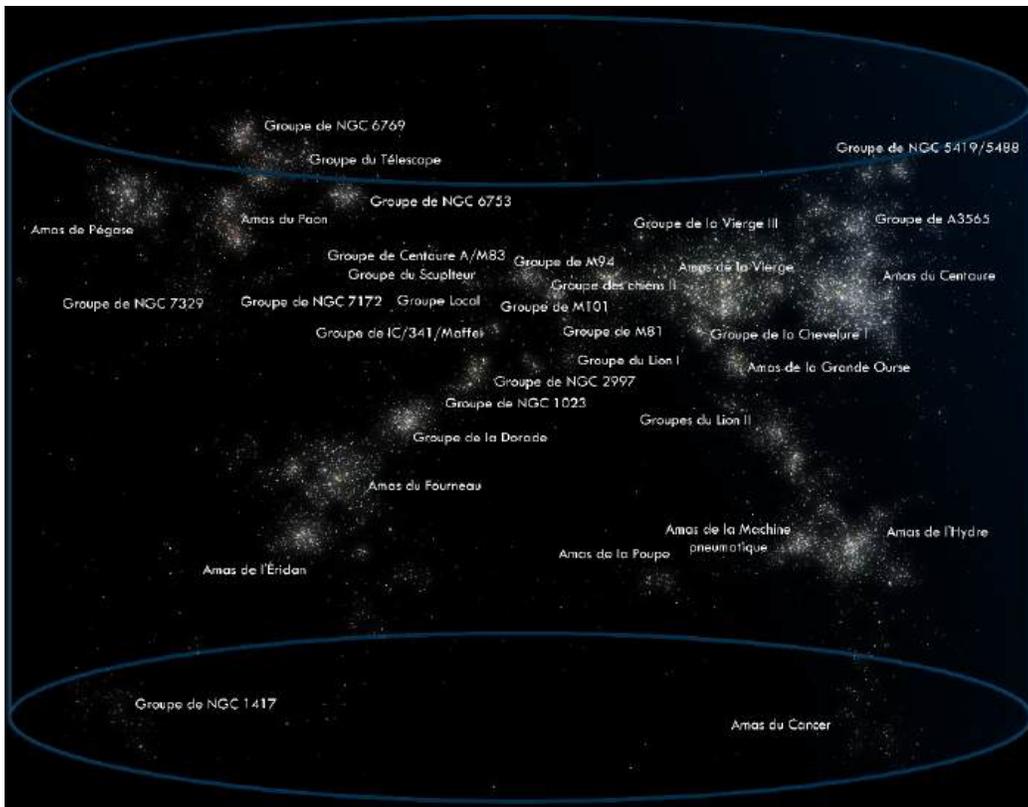
apod.nasa.gov/apod/ap071001.html

Généralement, les amas contiennent plusieurs centaines ou plusieurs milliers de galaxies et ont un diamètre de l'ordre d'une dizaine de millions d'années-lumière.

Le superamas local

Les amas et les groupes se regroupent en superamas ayant, typiquement, un diamètre de l'ordre de 500 Mal et une masse de 100 000 fois la masse de la Voie lactée.

Le groupe local n'est qu'un petit groupe qui fait partie du *superamas local*, aussi appelé *Laniakea*, dont le centre est l'amas de la vierge. Il contient environ 400 groupes et amas.



Par Andrew Z. Colvin — Travail personnel, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=71065242>

Sur cette image, les cercles en haut et en bas ont un diamètre d'environ 500 Mal.

L'amas de la Vierge, avec plus de 2000 galaxies, dont 100 grosses galaxies, est dans une catégorie à part. La largeur angulaire de cette image à droite de l'amas de la Vierge vue de la Terre est d'environ $2,2^\circ$, soit plus de 4 fois la pleine Lune.

Cette concentration de galaxies dans l'amas de la Vierge favorise les collisions de galaxies. Le fait qu'on trouve de gigantesques galaxies elliptiques (dont M87, présenté plus tôt) au centre de cet amas semble confirmer l'idée que les galaxies elliptiques sont le résultat de collision de grandes galaxies.



www.aao.gov.au/images/captions/uks031.html

Dans un superamas, l'accélération des amas et des groupes est dirigée vers le centre de masse du superamas. Dans notre superamas, le centre de masse s'appelle le *grand attracteur*.

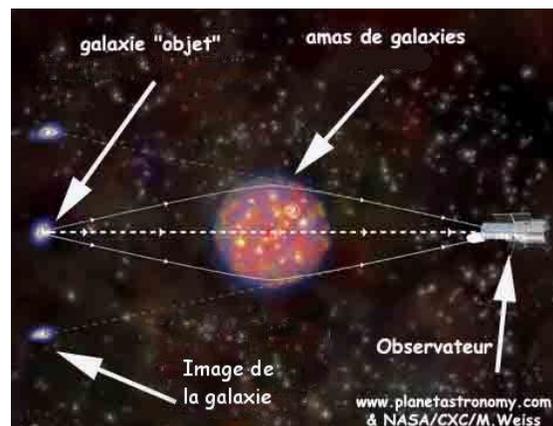
Les galaxies formant un amas sont liées gravitationnellement, ce qui veut dire que la gravitation est assez grande pour garder toutes les galaxies ensemble. Quelques galaxies pourraient bien s'échapper de temps en temps, mais la grande majorité des galaxies va rester dans l'amas. Par contre, les amas formant les superamas ne sont pas liés gravitationnellement. Cela veut dire que la gravitation n'est pas assez grande pour garder les amas et les groupes ensemble (et que l'énergie mécanique totale est positive). Les composantes d'un superamas pourraient donc se disperser au bout d'un temps relativement long.

La masse des amas et des superamas

On trouve la masse des amas et des superamas de la même façon qu'on trouve la masse des galaxies.

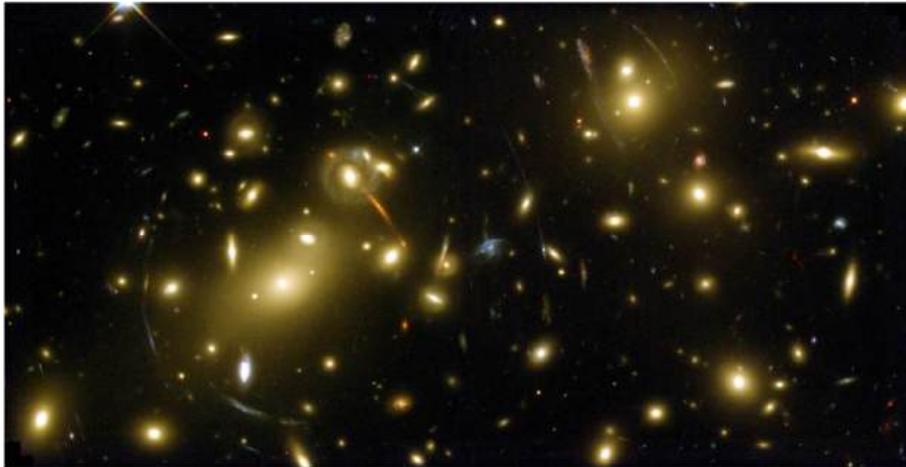
Avec le mouvement des galaxies en périphérie des amas, on peut déterminer la masse de l'amas avec la loi de la gravitation

On peut aussi utiliser la déviation de la lumière faite par les amas et les superamas pour déterminer leur masse (figure de droite).



www.planetastronomy.com/special/2008-special/04mar08/matnoire-bertone-iap.htm

L'image suivante montre les déviations de lumière faites par l'amas Abell 2218.



en.wikipedia.org/wiki/Abell_2218

Comme l'alignement des galaxies lointaines avec l'amas de galaxies n'est pas parfait, on obtient de grands arcs plutôt qu'un cercle complet autour de l'amas.

La matière sombre

Quand on calcule la masse des groupes, des amas et des superamas avec les lois de la gravitation ou avec la déviation de la lumière, on se rend compte que la masse est beaucoup plus grande que la masse des étoiles.

Le rapport M/L des amas de galaxies est d'environ $300 M_{\odot}/L_{\odot}$! En se rappelant que la valeur se situerait aux environs de $4 M_{\odot}/L_{\odot}$ s'il n'y avait que des étoiles dans les amas, on comprend assez vite que ça fait beaucoup de masse qui n'est pas sous forme d'étoile. La masse des amas serait près de 75 fois plus grande que celle des étoiles. L'étude des amas nous permet donc de détecter une quantité importante de matière sombre.

Cette masse des amas plus grande que la masse visible de l'amas est en fait une extension de notre première preuve de l'existence de matière sombre dans l'univers.

Première preuve de l'existence de la matière sombre

La masse des amas mesurée à l'aide de la gravitation est environ 75 fois plus grande que la masse des étoiles des amas.

(ou les lois de la gravitation sont fausses)

(Rappelons-nous qu'on pourrait obtenir une masse plus raisonnable si on modifiait les lois de la gravitation. On étudie cette possibilité en ce moment.)

On peut même déterminer la distribution de matière sombre dans les amas. L'image de droite montre la distribution de matière sombre dans l'amas Abell 901/902.



[www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Hubble_finds_double_Einstein_ring_and_other_results/\(print\)](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Hubble_finds_double_Einstein_ring_and_other_results/(print))

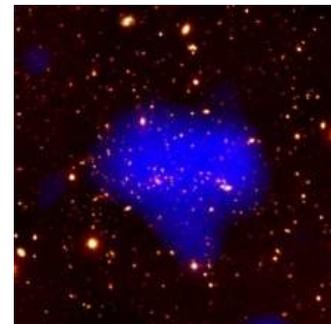
Les zones en mauve, montrant la matière sombre, ont bien sûr été ajoutées par ordinateur puisqu'il est impossible de voir la matière sombre.

Comme mentionnée plus tôt, cette matière sombre pourrait être composée de matière ordinaire (proton, neutron et électrons) formant des planètes, des nuages de gaz, de la poussière, des trous noirs ou d'autres objets de ce type n'émettant pas beaucoup de lumière. Toutefois, on imagine mal comment il pourrait y avoir autant de matière ordinaire et une partie de cette matière sombre pourrait avoir une autre composition.

Les gaz chauds

La masse anormalement élevée des amas par rapport à la masse des étoiles est confirmée aussi par le fait que les amas parviennent à garder de l'hydrogène diffus. Ce gaz est très chaud parce qu'il émet du rayonnement X, ce qui nous permet de l'observer. Par exemple, voici ce gaz dans l'amas MS-1054-0321, mis en évidence par son rayonnement X qu'on a superposé à l'image en visible.

Si la masse des amas correspondait simplement à la masse des étoiles, les amas ne pourraient pas retenir ce gaz chaud avec une gravitation aussi faible. Mais avec 75 fois plus de masse, la masse des amas est suffisante pour que la force gravitationnelle retienne ce gaz.

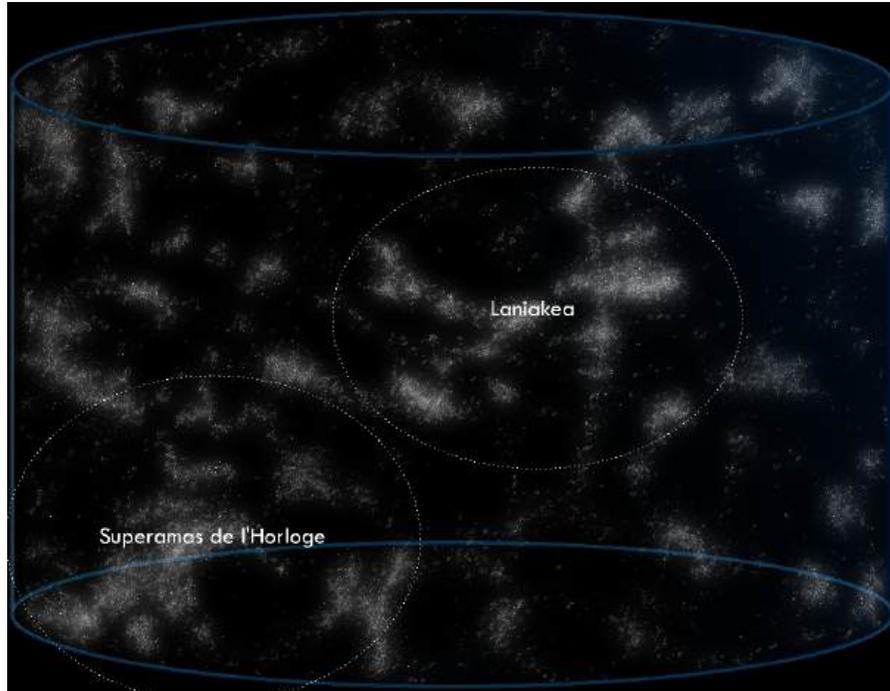


hubblesite.org/newscenter/archive/releases/1998/26/image/d/

Notez que la masse de ce gaz est à peu près la même que la masse des étoiles de l'amas, et parfois un peu plus que la masse des étoiles. Ça explique une partie de la masse de l'amas, mais c'est loin d'être suffisant pour expliquer la masse manquante des galaxies, qui est en moyenne 75 fois plus grande que la masse des étoiles.

12.16 LA SUPERSTRUCTURE DE L'UNIVERS

Voici maintenant une carte d'une région encore plus vaste de l'univers.



Par Andrew Z. Colvin — Travail personnel, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=71065242>

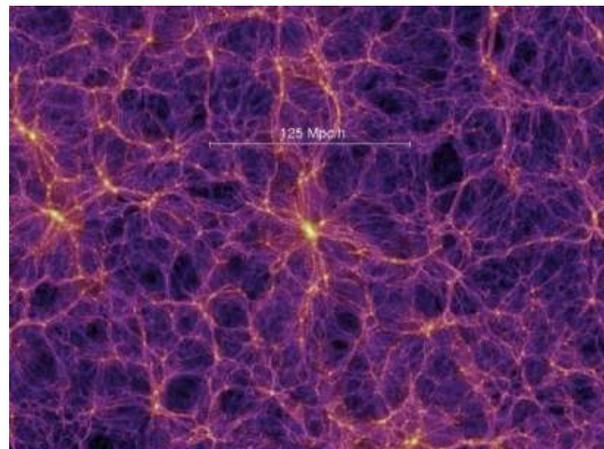
Sur cette image, les cercles en haut et en bas ont un diamètre d'environ 2000 Mal.

(En fait, je n'arrive pas à trouver une image à jour ni même des informations fiables concernant les superamas. Depuis que la définition des superamas a changé en 2014, il y a une énorme confusion entre les anciens et nouveaux amas.)

Le superamas le plus près du notre est le superamas de l'Horloge, dont le centre est dans la direction de la constellation de l'Horloge. Il a une taille et une masse similaires à notre superamas. Il faut parcourir 700 Mal avant d'atteindre ce superamas.

L'image de droite montre une structure similaire à celle de notre univers. Ce n'est pas la structure de notre univers, c'est une structure obtenue lors d'une simulation.

Sur cette image, chaque point lumineux est une galaxie. L'image a une largeur de près de 1,6 milliard d'années-lumière.



www.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/

Sur cette image, on voit que les galaxies s'organisent pour former des filaments et des surfaces (appelés murs) délimitant des régions presque vides ayant un diamètre d'environ 300 millions d'années-lumière. Laniakea fait partie d'un long filament des superamas qui s'appelle *le mur du Centaure*. En 2013, on a découvert une énorme muraille de galaxies située à 10 Gal et qu'on a appelée la *Muraille d'Hercule-Couronne Boréale*. Ce mur a une largeur de 3 Gal et une épaisseur de 2,2 Gal.

Vous pouvez même faire un petit voyage dans cette structure.

<https://www.youtube.com/watch?v=GzDlw8H6NpI>

Ce sont les plus grandes structures de l'univers. En prenant une région de l'univers encore plus grande, on ne voit pas apparaître de nouvelle structure. L'image de droite, montrant une structure similaire à celle de notre univers, nous illustre la structure de l'univers sur une largeur de 6,7 milliards d'années-lumière.

À cette échelle, on pourrait même commencer à considérer que l'univers est assez uniforme et homogène.

