

**VOYAGE
DANS
L'ESPACE**

Épisode

52

**LES GALAXIES:
AUX FRONTIÈRES DE LA COSMOLOGIE**



Comment se fait-il que nous existions?

Le balado et les fascicules

Depuis janvier 2018, Claude Lafleur et Mathieu Rancourt produisent un balado consacré à l'exploration de l'espace. Intitulé *Voyage dans l'espace*, il est diffusé sur la plate-forme soundcloud.com. Chaque épisode vous fait parcourir une dimension particulière, qu'il s'agisse de l'exploration d'une planète, de la recherche de vie dans l'Univers ou de l'aventure des astronautes et de ceux et celles qui rêvent d'espace.

Pour chaque balado, ils préparent un exposé détaillé, sous forme de questions/réponses. Ils publient ces exposés sous forme de fascicules pdf, comme celui-ci. Il s'agit donc d'une conversation entre l'animateur de *Voyage dans l'espace*, Mathieu, et le passionné d'espace, Claude.

Notez que le balado diffusé s'inspire librement des questions/réponses préparées à cet effet. Le texte qui suit n'est pas un verbatim de l'émission, mais plutôt une autre version; le balado et ce fascicule se complètent l'un et l'autre.

Tous les fascicules sont offerts aux abonnés du balado *Voyage dans l'espace*, abonnement au coût de 5\$/mois, via la plate-forme patreon.com.

Mathieu Rancourt est géographe et professionnel de recherche. **Claude Lafleur** est journaliste scientifique qui suit au quotidien depuis cinquante ans les péripéties de l'exploration spatiale.

L'équipe des fascicules:

Rédaction:

Claude Lafleur et Françoise Combes

Couverture: Mathieu Rancourt

Illustrations: NASA, ESA, ESO.

Courriel: claudelafleur1@videotron.ca

© Copyright, Claude Lafleur, 2020

ISBN 978-2-925106-09-8 (pdf)

Balado: <https://soundcloud.com/voyage-danslespace/>

ISBN 978-2-925106-08-1 (kindle)

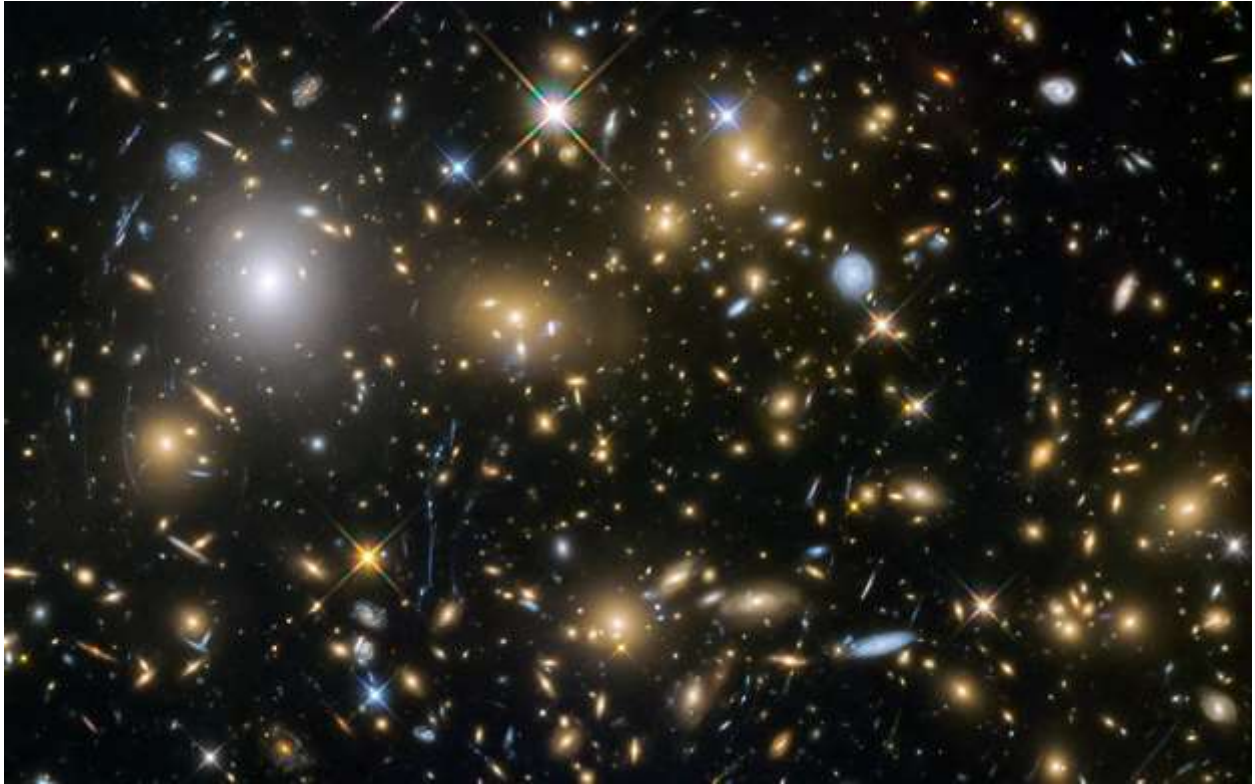
Abonnement:

<https://www.patreon.com/voyagedanslespace>

Dépôt légal: Bibliothèque nationale du Québec, 2020

Facebook: <https://www.facebook.com/voyagedanslespace/>

Dépôt légal: Bibliothèque nationale du Canada, 2020



Des galaxies par centaines et vues sous tous les angles.

Les galaxies: aux frontières de la cosmologie

[Écoutez](#) le balado *Les Galaxies...* diffusé le 1^{er} novembre 2020.

Dans ce Fascicule, nous abordons un volet de l'exploration spatiale pas facile à comprendre: la cosmologie. Il s'agit de la branche de l'astronomie qui s'intéresse aux grandes questions fondamentales: d'où vient l'Univers, comment évolue-t-il et vers quoi s'en va-t-on? Autrement dit: comment se fait-il que nous existions?

Il s'agit de notions complexes et pas faciles d'accès dont traite cependant très élégamment une spécialiste de ces questions: Françoise Combes.

Mme Combes est astrophysicienne, professeure au Collège de France, à la chaire *Galaxies et cosmologie*. Durant sa longue carrière scientifique, qui s'échelonne sur 45 ans, elle a entre autres œuvré comme astronome à l'Observatoire de Paris ainsi que dans plusieurs autres observatoires à travers le monde.



L'astrophysicienne Françoise Combes.

Ses travaux portent sur la physique galactique, c'est-à-dire la formation, l'évolution et la composition des galaxies. Ses recherches s'appuient à la fois sur des observations astronomiques et sur des simulations numériques théoriques. Elle s'intéresse également à la matière noire et étudie ses différents modèles et alternatives.

Professeure Combes est membre de l'Académie des sciences depuis 2004 et a reçu de nombreux prix et décorations. Elle a ainsi été la première femme astronome à être élue membre de l'Académie des sciences. En 2006, elle a été faite chevalier de l'ordre national de la Légion d'honneur, avant d'être promue au rang d'officier en 2015. Et tout récemment, on lui a décerné la prestigieuse médaille d'or du Centre National de Recherche Scientifique (CNRS). Elle est également éditrice de la revue scientifique européenne *Astronomy and Astrophysics*.

Elle a rédigé de nombreux ouvrages, dont: [La Voie lactée](#), publié en 2013; [La matière noire, clé de l'Univers?](#) (2015) et tout récemment: [Le Big Bang](#), dans la célèbre collection *Que sais-je?* (en 2019).

Claude Lafleur l'a interviewée le 14 octobre 2020.

* * *

Bonjour Professeure Combes. Comment en êtes-vous venue, au cours de votre jeunesse, à vous intéresser aux sciences et, éventuellement, à l'astronomie?

Contrairement à mes collègues qui, pour la plupart, faisaient des observations depuis leur jardin à l'aide de petits télescopes, moi, pas du tout! En fait, je suis venue un peu tard à l'astrophysique.

Lorsque j'étais jeune, j'avais avant tout envie de faire de la recherche. Je me



passionnais pour les grands chercheurs qui ont révolutionné leur secteur, comme par exemple Copernic qui a placé la Terre à sa place – c'est-à-dire non pas au centre de l'Univers mais ailleurs. En biologie, Pasteur était mon idole puisqu'avec ses travaux en laboratoire et en médecine, il a conçu le premier vaccin – et on voit bien de nos jours à quel point on a besoin de vaccins! Je constatais donc qu'en faisant de la recherche scientifique, on pouvait apporter un bien énorme à l'humanité. Voilà ce qui m'a frappé, c'est-à-dire qu'avec un travail de recherche, on peut avoir un immense impact sur la vie de tous les jours. C'est cela qui m'a plu et je me suis dit que j'allais sans doute un jour faire de la recherche, mais sans savoir exactement ce qu'il me fallait faire pour y parvenir.

Peu à peu, j'ai fait des études et j'allais toujours aussi loin que celles-ci m'entraînaient. On me disait aussi qu'il ne fallait pas choisir trop vite. J'ai donc fait beaucoup de physique et de maths – ce qui me plaisait beaucoup – et j'ai passé le con-

cours d'entrée à l'École normale supérieure en maths. Or, lorsque j'ai passé ce concours à l'oral, les professeurs m'ont suggéré: «Vous, vous devriez faire de la physique.» Au début, je pensais que les maths, c'était le plus intéressant, mais on m'a finalement convaincue que la physique serait préférable pour moi.

Je me suis donc intéressée à la physique et j'ai fait ce qu'on appelle à présent des *masters* – des diplômes d'études approfondies – en physique. J'ai donc suivi des cours de physique atomique, de physique quantique, de physique moléculaire, etc. Puis, à la fin du *master*, il fallait faire une petite thèse de 3^e cycle – pour voir si on aimerait faire de la recherche – et c'est alors qu'il m'a fallu choisir un thème.

Après deux années de classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE) à Montpellier, Françoise Combes intègre l'École normale supérieure de la rue d'Ulm à Paris où elle obtient un diplôme d'études approfondies (DEA) de physique. Elle prépare ensuite une thèse de doctorat de 3^e cycle à l'université Paris-Diderot (Paris-VII) sur les modèles d'univers symétriques de matière/antimatière.

Comment devient-on astronome? Quelle est votre parcours?

En fait, l'astrophysique rassemble toute les physiques à la fois. Cela englobe des matières comme la physique nucléaire, la chimie interstellaire, la dynamique, la mécanique, la thermodynamique, etc. Il n'y a donc pas de *master* en astrophysique, c'est plutôt un *master* de physique.

Et puis, la physique quantique, la physique atomique, etc. m'ont beaucoup servi par la suite lorsque j'ai observé des molécules dans le milieu interstellaire. C'est dire qu'en astrophysique, toute la physique sert en fin de compte.

À la fin de mon *master* en physique, il m'a fallu choisir un sujet et c'est alors que j'ai choisi... l'astrophysique!

En 1975, Françoise Combes passe l'agrégation de sciences physiques. Elle se passionne ensuite pour l'astronomie et obtient un doctorat d'État en astrophysique avec une thèse sur la dynamique et la structure des galaxies.



Pourquoi existons-nous? (L'asymétrie de l'Univers)

En faisant une visite dans des laboratoires, j'ai été attirée par la cosmologie, qui revient à étudier tout ce qui nous entoure – l'origine des grandes structures de l'Univers, les galaxies, les étoiles, les planètes... – et pourquoi nous sommes là. Voilà qui allait me passionner!

À l'époque, il y avait les professeurs [Evry Schatzman](#) et [Roland Omnès](#) qui s'intéressaient à l'idée d'un Univers symétrique, c'est-à-dire d'un Univers composé autant par de la matière que de l'antimatière.

Il faut savoir que peu après le Big Bang, l'Univers était constitué d'énormes quantités d'énergie à très haute température. Il est alors constitué de photons: des particules de lumière qui étaient tellement énergétiques que celles-ci créaient constamment des paires de particules de matière et d'antimatière. Mais ces paires s'annihilaient sans cesse en redevenant des photons.

Toutefois, avec le temps, l'Univers en expansion s'est dilué et les températures ont diminué, de sorte qu'il est arrivé un moment où les photons n'ont plus eu assez d'énergie pour générer des paires de particules de matière et d'antimatière. Mais la matière continuait de s'annihiler avec l'antimatière.

Or, si l'Univers avait été parfaitement symétrique – s'il avait été fait d'autant de particules de matière que de particules d'antimatière –, il ne devrait plus rien rester. Nous n'existerions tout simplement pas! L'Univers n'est donc pas symétrique. Mais pourquoi donc?

La question se pose parce que même de nos jours, lorsqu'on crée de la matière dans nos [accélérateurs de particules](#), on obtient toujours autant de particules de matière que d'antimatière. C'est-à-dire

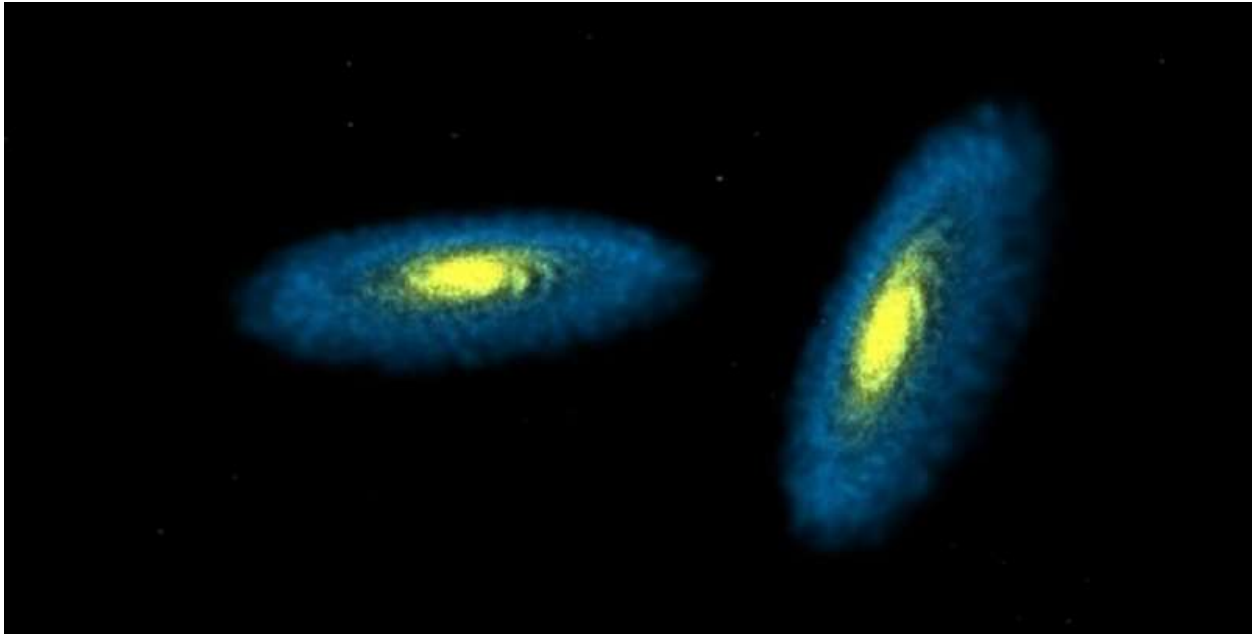
que pour chaque proton, on obtient également un antiproton, donc des particules atomiques qui ont la même masse et les mêmes propriétés, mais qui sont de charge électrique opposée. Ce qu'on obtient est parfaitement symétrique.

On ne sait donc toujours pas pourquoi il y aurait une asymétrie entre matière et antimatière dans l'Univers. Le modèle de cosmologie standard postule tout de même qu'il a bien dû y avoir un petit excès de matière – un excès qui ne serait que d'un milliardième de la matière sur l'antimatière – donc un très petit excès. En fait, on est *obligé* de postuler une telle chose, même si on ne sait pas pourquoi, car autrement, on n'existerait pas!

Mais revenons à la fin des années 1970. A cette époque, Roland Omnès et Evry Schatzman, pour garder l'idée de symétrie matière-antimatière, émettent l'hypothèse que l'Univers pourrait être une sorte d'[émulsion](#) – un peu comme une émulsion d'huile et de vinaigre qui ne se mélangent pas. C'est-à-dire que la matière et l'antimatière ne se seraient pas mélangées tout à fait, qu'il devait y avoir une quantité de matière d'un côté et une quantité d'antimatière de l'autre. Il y aurait par conséquent des galaxies faites de matière et d'autres faites d'antimatière.

Évidemment, ces galaxies et «anti-galaxies» peuvent s'annihiler lorsqu'elles se rencontrent mais, entre-temps, elles peuvent exister très longtemps en tant que

à



Imaginez deux galaxies qui entrent en collision... Si l'une était faite de matière et l'autre d'antimatière, on ne pourrait pas le savoir d'avance. Cependant, au moment de la collision, elles s'annihileraient et dégageraient une quantité prodigieuse de rayons gamma. Malheureusement, ou heureusement peut-être, on n'a jamais assisté à un tel événement.

galaxies de matière et galaxies d'antimatière.

Mais en se rencontrant, de telles galaxies s'annihileraient et dégageraient par le fait même d'énormes quantités de rayons gamma. Or, on devrait pouvoir détecter ces rayons gamma, ce qu'on n'ob-

serve pas. Nous avons donc dû abandonner ce modèle, comme c'est le cas pour bon nombre de théories. En science, vous savez, on conçoit énormément de théories, mais 90% d'entre elles finissent par être abandonnées.

Bref, on cherche toujours la théorie qui nous permettra de tout comprendre!

Qu'est-ce qu'une galaxie?

Nous allons beaucoup parler des galaxies. Présentons d'abord ce qu'est une galaxie.

Une galaxie, c'est un immense ensemble de matière – principalement des étoiles, ainsi que du gaz atomique et moléculaire. Et pour l'essentiel, une galaxie est faite d'hydrogène.

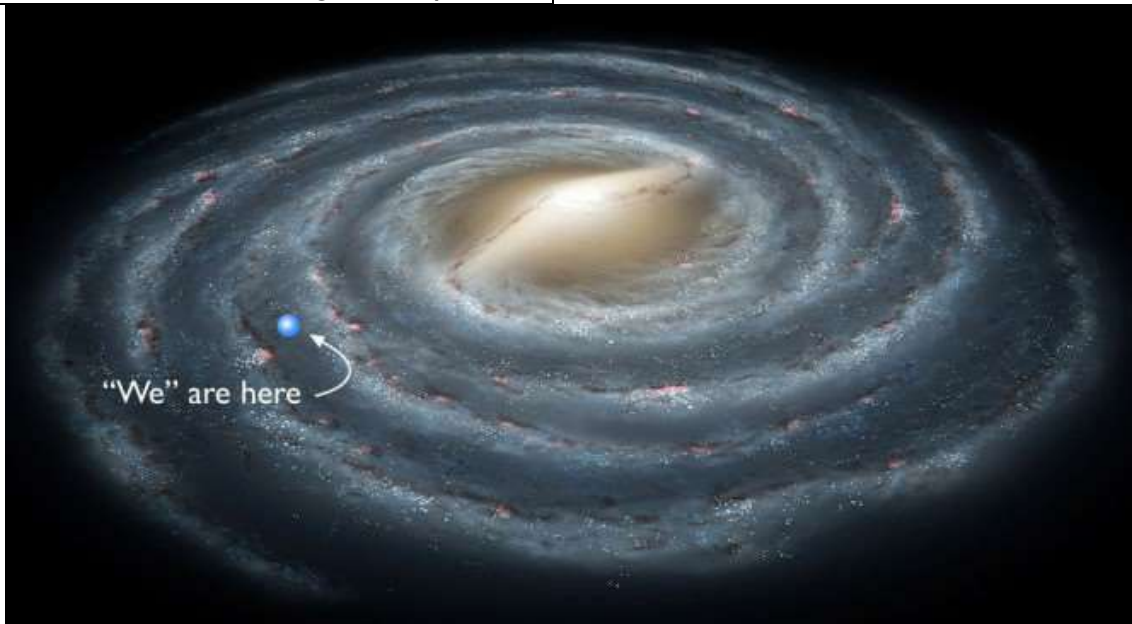
Une galaxie ressemble à une «île cosmique» perdue dans une immensité de vide sidéral. La plupart des galaxies

prennent la forme de large disque plat qui ont plus ou moins les proportions d'un CD.

C'est ainsi que notre galaxie, la Voie lactée, mesure environ 100 000 années-lumière de diamètre mais elle n'a qu'une épaisseur de 1000 années-lumière. Elle est donc cent fois plus mince que large.

On calcule qu'elle contient au moins 200 milliards d'étoiles, peut-être même jusqu'à 400 milliards. Ces milliards d'étoiles forment de longs bras qui sont

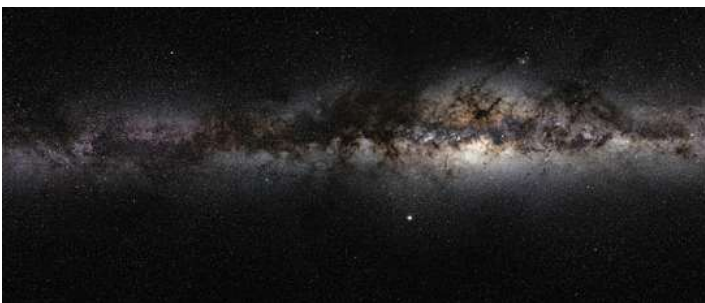
recourbées pour donner lieu à une majestueuse spirale.



Notre galaxie est un disque plat formé de centaines de milliards d'étoiles qui constituent de longs bras spiralés. Nous, nous habitons l'un de ces bras (celui d'Orion), en périphérie.

Ajoutons, car c'est très important, qu'une galaxie contient énormément de poussière. C'est pour cela que, lorsqu'on observe la Voie lactée, on voit une longue bande blanchâtre traverser le firmament.

Mais dans cette bande blanchâtre, on aperçoit des zones sombres. Il ne s'agit



Une portion de la Voie lactée, telle qu'on l'aperçoit au firmament. On y voit quantité de zones sombres qui semblent dénuées d'étoiles.

pas, comme on l'a longtemps pensé, de zones dénuées d'étoiles, mais plutôt de zones où la poussière absorbe toute la lumière émise par les étoiles qui se trouvent derrière. Ces nuages de poussière cachent en réalité des milliards d'étoiles.

Cette poussière représente une très petite partie de la masse de la galaxie, mais elle revêt une grande importance, car elle absorbe la lumière des étoiles. (Nous allons y revenir...)

Enfin, les galaxies contiennent énormément de matière noire, comme nous allons également le voir un peu plus loin.



Lorsque vous et moi, on regarde le ciel, on ne perçoit qu'une portion de la Voie lactée. Et puisque qu'elle traverse le ciel du pôle nord jusqu'au pôle sud, il faut parcourir les deux hémisphères pour la voir dans sa totalité. Ici, Wikipédia publie un photomontage recréant toute la Voie lactée. On distingue alors clairement la forme de disque plat que prend notre galaxie.

L'Univers tel qu'on l'imaginait il y a cent ans

Mais retournons d'abord à il y a un siècle, en 1920. Nous avons alors une vision de l'Univers très différente de celle que nous avons à présent. Qu'était l'Univers, selon notre conception d'il y a un siècle?

Il y a cent ans, notre Univers était tout petit, puisqu'on pensait que ce n'était que notre Voie lactée. Mais c'était déjà plus grand que la vision qu'avaient les précédents cosmologistes, puisqu'à l'époque de l'Antiquité, on pensait que l'Univers se résumait à notre Système solaire. On ne fait qu'agrandir notre Univers au fur et à mesure que progressent nos connaissances.

Il y a cent ans, nous pensions que l'Univers, ce n'était que notre Voie lactée.

Voilà. Pourquoi? Parce qu'on estimait que ce qu'on perçoit à présent comme des galaxies – Andromède ou la galaxie des chiens de chasse, par exemple – n'étaient que de simples nébuleuses, que des amas de gaz. En réalité, ces «nébuleuses» sont si lointaines qu'on ne parvenait pas à distinguer les étoiles qui les composent. On avait donc l'impression que ce n'était que de simples nuages de gaz.

Ainsi, on pensait que la nébuleuse d'Andromède n'était qu'un nuage de gaz se

trouvant dans la Voie lactée. C'est pour quoi on parlait de la *nébuleuse d'Andromède*. Mais en réalité, ce n'est pas une nébuleuse – c'est-à-dire un simple nuage de gaz – mais bien une majestueuse galaxie.



La belle nébuleuse d'Andromède...
une spectaculaire galaxie!

Il y a un siècle, nous estimions que la Voie lactée était tout l'Univers et dans celle-ci se trouvaient des nuages de matière dont on ne distinguait pas la nature. Il s'agissait de nuages quelconques

que nous appelions des nébuleuses. Lorsqu'on dit que quelque chose est nébuleux, dans le fond, on emploie un terme d'astronomie!



Une nébuleuse photographiée dans les années 1920: de quoi s'agit-il?

C'est exact. Et ajoutons qu'en 1920, il y avait un grand débat entre [Harlow Shapley](#) et [Heber Curtis](#), deux astronomes américains. L'un d'eux estimait que notre galaxie était très vaste et qu'elle englobait toutes les nébuleuses, tandis que l'autre considérait que ce n'était pas possible, qu'on ne pouvait pas avoir une galaxie suffisamment vaste pour englober toutes les nébuleuses. En réalité, les deux astronomes discutaient de la notion de distance, de la taille de l'Univers.

Or, en astronomie, la notion de distance est fondamentale puisqu'on cherche toujours à déterminer à quelle distance se trouvent les objets qu'on observe, car c'est ce qui nous permet de déterminer leur taille.

Et c'est alors que l'astronome américaine [Henrietta Leavitt](#) a fait une contribution déterminante.

Les céphéides d'Henrietta Leavitt



À cette époque, Mme Leavitt (ci-contre) se consacrait à l'étude des étoiles variables, c'est-à-dire d'un type d'étoiles de la Voie lactée dont la brillance varie d'un jour à l'autre. C'était une tâche très fastidieuse puisqu'il lui fallait observer quantité d'étoiles, nuit après nuit et sans relâche, afin de repérer celles dont la luminosité varie.

Elle a fini par repérer deux mille étoiles dites variables, ce qui constitue en soi une tâche monumentale. Il s'agit en fait d'un type d'étoiles très particulier qu'on appelle céphéide.

Les céphéides sont des étoiles géantes, quatre à quinze fois plus massives que le Soleil et de cent à trente mille fois plus lumineuses. Or, l'éclat de ces étoiles varie selon une période bien définie, comprise entre 1 et 135 jours.

Ce qu'il y a de remarquable — pour ne pas dire de sensationnel — à propos des céphéides, c'est qu'elles nous permettent d'établir les distances dans l'Univers.

En effet, les travaux d'Henrietta Leavitt ont permis d'établir que plus une céphéide est lumineuse, plus sa période de variation d'éclat est longue. C'est dire que du moment où on connaît la période de variation de luminosité d'une céphéide, on peut déterminer son éclat *intrinsèque*, c'est-à-dire la luminosité

propre à cette étoile, indépendamment de la distance à laquelle on l'observe.

Bien sûr, plus une étoile est loin de nous, moins elle nous paraît brillante. Mais en connaissant la luminosité propre (intrinsèque) de l'étoile, on peut en déduire la distance à laquelle elle se trouve. Et comme la luminosité intrinsèque des céphéides est directement liée à leur période de variation de luminosité, on peut donc aisément calculer leur distance.

Or, on retrouve des céphéides non seulement dans notre galaxie, mais également dans les autres galaxies. C'est d'ailleurs en repérant des céphéides dans une galaxie qu'on parvient à établir sa distance.

Henrietta Leavitt a vraiment fait un énorme travail qui a ébranlé l'idée qu'on

se faisait d'une Voie lactée qui contiendrait tout l'Univers.

En se basant sur les travaux de Mme Leavitt, [Edwin Hubble](#) a entrepris d'examiner la nébuleuse d'Andromède afin d'y repérer des céphéides. Il en a détecté plusieurs, ce qui lui a permis de calculer qu'Andromède se trouve à une très grande distance de nous.

Hubble a établi qu'elle se trouve à 2 millions d'années-lumière de nous, ce qui dépassait à coup sûr la taille de la Voie lactée – et de beaucoup. C'est ainsi qu'on en est venu à se dire qu'Andromède devait être un monde à part, une galaxie.

On a alors commencé à se dire que tout ne pouvait pas être contenu dans la Voie lactée, de sorte que notre Univers s'est tout d'un coup agrandi énormément puisqu'on a repéré plusieurs autres galaxies à plus grande distance encore.

Des galaxies fuyantes!

Par la suite, des astronomes ont entrepris de mesurer la distance à laquelle se trouvent les nébuleuses... pour réaliser que bon nombre d'entre elles sont en réalité des galaxies se trouvant bien au-delà de la Voie lactée.

Ils ont aussi découvert que les galaxies ne sont pas fixes, mais qu'elles se déplacent. Pour ce faire, ils utilisent une technique d'observation assez particulière: ils mesurent l'[effet Doppler](#), c'est-à-dire une variation dans la fréquence des ondes lumineuses en provenance des galaxies.

L'effet Doppler nous est familier lorsqu'on entend venir une voiture de course ou une ambulance. Comme on l'entend facilement, en s'approchant de nous, la tonalité du son émis par le véhicule change. Ainsi, en s'approchant de nous, on entend un son plutôt aigu. Puis, lorsque la voiture nous dépasse et

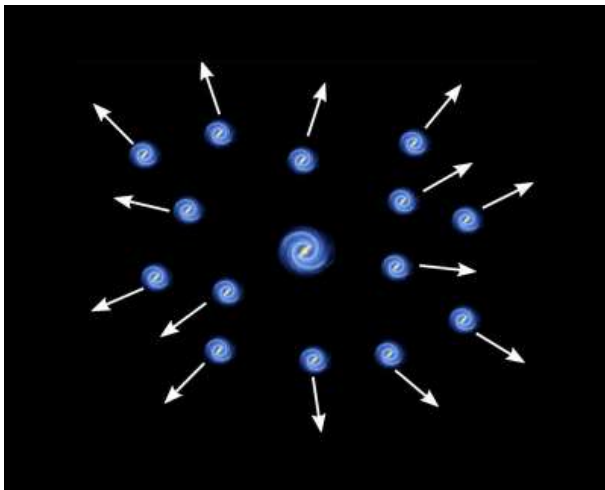
s'éloigne, ce son devient plus sourd. C'est dire qu'une voiture – ou une galaxie – qui s'approche de nous émet des ondes de fréquence plus courte que lorsqu'elle s'éloigne.

Pour les astronomes, si une galaxie s'approche de nous, sa lumière sera décalée légèrement vers le bleu, tandis que si elle s'éloigne, elle sera légèrement décalée vers le rouge. Et ce décalage sera d'autant plus prononcé que la vitesse de la galaxie est grande (par rapport à nous).

Or, les astronomes observent que la lumière en provenance des galaxies est toujours décalée vers le rouge (ce qu'ils

appellent couramment le *red shift*). Et ce décalage est d'autant plus porté vers le rouge que les galaxies sont distantes de nous.

On s'est étonné d'observer que toutes les galaxies semblaient s'éloigner de nous. Et ce qui nous a surpris davantage, c'est qu'elles s'éloignent de nous à très grande vitesse, à des vitesses de mille à deux mille kilomètres *par seconde*!



D'autre part, Edwin Hubble a compilé toutes les observations faites par ses collègues et lui pour en arriver à découvrir qu'il existe une relation entre la vitesse d'éloignement apparente des galaxies et leur distance. Cette relation, qu'on a appelé la loi de Hubble, nous dit que la vi-

tesse d'éloignement des galaxies est proportionnelle à leur distance.

La loi de Hubble-Lemaître

La loi de Hubble – plus tard rebaptisée loi de Hubble-Lemaître – rend compte du fait que les galaxies s'éloignent les unes des autres à une vitesse proportionnelle à leur distance: plus une galaxie est loin de nous, plus elle s'éloigne rapidement. Cette loi s'énonce tout simplement comme suit:

$$v = H_0 d$$

où v est la vitesse d'éloignement d'une galaxie, H_0 est la *constante de Hubble* et d est la distance de la galaxie.

Notons qu'établir de façon très exacte la valeur de la constante de Hubble est très important, car cela détermine la vitesse d'expansion de l'Univers.

Or, depuis bientôt un siècle, les astronomes s'affairent à établir et à valider cette valeur qui a de grands impacts sur notre compréhension de l'évolution de l'Univers.

Sommes-nous toujours au centre de l'Univers?

Ouvrons ici une parenthèse... À l'époque où on pensait que la Voie lactée constituait tout l'Univers, on se plaçait au centre de celui-ci, n'est-ce pas?

En effet, encore une fois, et comme toujours!

On a cette tendance à toujours se placer au centre de l'Univers!

Mais il y avait une bonne raison pour laquelle on se croyait au centre de notre galaxie, donc de l'Univers.

C'est que nous n'avions pas pris en compte l'obscurité générée par la poussière présente dans notre galaxie – les énormes nuages de poussière qui font que, lorsqu'on regarde la Voie lactée, on voit ce qui nous semble être des trous.

Au début du XX^e siècle, un astronome hollandais, [Jacobus Kapteyn](#), a eu l'idée de faire la cartographie des étoiles qu'ils voyaient au firmament en fonction de leur distance. Il s'est dit que chaque étoile devait avoir, en moyenne, la même luminosité. «C'est ainsi que les étoiles qui sont moins lumineuses, je vais les imaginer plus loin que celles plus brillantes car, bien sûr, les plus brillantes sont plus proches de nous...» C'était logique.

Mais Kapteyn ignorait la présence de la poussière qui obscurcit l'éclat des étoiles. En effet, certaines étoiles brillent moins que d'autres non pas parce qu'elles sont plus loin, mais parce qu'il y a de la poussière entre elles et nous.

Voilà ce qui nous a donné l'impression d'être au centre de toutes les étoiles – d'être au centre de la Voie lactée – parce qu'au fur et à mesure que des étoiles sont distantes de nous, il y a de plus en plus de poussière, pour finir par ne plus en voir.

Si vous voulez, c'est un peu comme celui qui se promène la nuit avec une lampe de poche; il voit un rayon lumineux tout

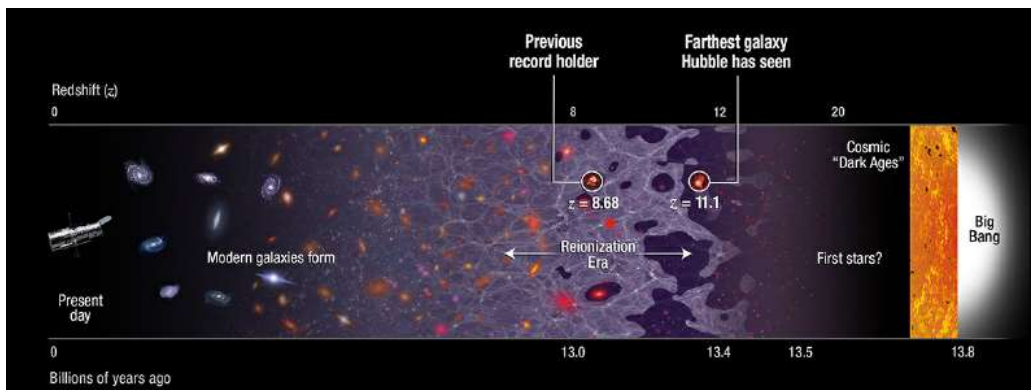
autour de lui et il se trouve toujours au centre de ce rayon lumineux. Où qu'il soit, il se perçoit au centre. C'est un peu le même phénomène qu'on perçoit lorsqu'on observe les étoiles de la Voie lactée.

C'est ce qui fait qu'à l'époque où on croyait que l'Univers se résumait à notre galaxie, on se croyait naturellement au centre de celui-ci. Mais maintenant qu'on a découvert que toutes les galaxies s'éloignent de nous, nous pourrions en conclure que nous sommes encore une fois au centre de l'Univers. On a donc sans cesse l'impression d'être toujours au centre de tout!

Mais c'est uniquement une apparence. L'Univers est sans doute infini et par conséquent, chaque observateur se perçoit au centre de son horizon.

Car oui, il y a un horizon. Pourquoi? Parce que même si l'Univers est infini, on ne pourra jamais voir au-delà d'une certaine distance. En fait, plus on regarde au loin, on ne voit pas seulement plus loin, mais on remonte aussi dans le temps!

En effet, observer de plus en plus loin dans l'Univers – grâce par exemple au télescope Hubble – ça revient à remonter le temps. Pourquoi?



Plus un télescope regarde au loin, comme le fait Hubble (à gauche), plus il explore en profondeur l'espace, tout en remontant dans le temps... pratiquement jusqu'au Big Bang (à droite).

Parce que la vitesse de la lumière n'est pas infinie, elle est de 300 000 kilomètres par seconde. C'est ainsi que le signal lumineux qui nous parvient d'une galaxie se trouvant, disons, à 10 milliards d'années-lumière de nous, a mis 10 milliards d'années à nous parvenir. Par conséquent, on voit cette galaxie telle qu'elle était il y a

10 milliards d'années – et non pas comme elle est aujourd'hui. On voit une jeune galaxie... qui est aujourd'hui beaucoup plus âgée.

Plus on regarde au loin dans l'Univers, plus on remonte le temps. C'est fantastique, n'est-ce pas?

C'est l'espace qui s'étire

Comment explique-t-on le fait que toutes les galaxies semblent s'éloigner de nous, alors que nous ne sommes pas au centre de l'Univers? Et c'est la même chose pour tout observateur où qu'il soit dans l'Univers; de son point de vue aussi, toutes les galaxies semblent s'éloigner de lui.

Ah ça, ça été un beau mystère à résoudre.

Comme nous l'avons vu, il y a cent ans, les astronomes pensaient qu'ils mesureraient un effet Doppler, ce qui signifiait que les galaxies se déplacent. Mais ce n'est pas ce qui se passe en réalité, ce n'est pas un effet Doppler...

C'est [Georges Lemaître](#) qui a expliqué le phénomène dans les années 1920. Lemaître était un abbé belge, intéressé par la physique et l'astronomie. Il est «parti en post-doc», comme on dirait aujourd'hui, et dans son travail il a pris en compte toutes les observations des galaxies qui semblaient s'éloigner de nous. Mais il a estimé que cela n'était pas possible, que les galaxies ne pouvaient pas toutes s'éloigner de nous... et de tout autre observateur en même temps et où qu'il soit!

Il a fait le rapprochement avec les équations qu'[Albert Einstein](#) avait énoncées en 1915. À partir de sa théorie de la relativité générale, Einstein avait compris qu'en réalité, on a plutôt affaire à une déformation de l'espace.

En effet, selon les théories d'Einstein, la présence d'un objet lourd dans l'espace déforme celui-ci. Imaginez, par exemple, la surface élastique d'un trampoline au centre duquel on placerait un lourd boulet de canon. En enfonçant la toile du trampoline, ce boulet déforme l'espace. Et si vous déposez des boules de billard sur cette surface, elles tomberont naturellement vers le boulet, comme attirés par celui-ci. Voilà ce qui se passe dans l'espace, les gros objets – comme les galaxies – déforment l'espace autour d'eux.

Et selon les équations d'Einstein, qui définissent la géométrie de l'Univers, celui-ci devait être soit en expansion, soit en contraction. À partir de là, l'abbé Lemaître a considéré que l'éloignement des galaxies, le décalage vers le rouge, n'est pas un effet Doppler, mais que c'est plutôt l'espace qui s'étire, et non les galaxies qui bougent.

Pour se faire une idée de ce qui se passe, imaginons que nous nous trouvions

à la surface d'un ballon gonflable. On suppose que l'Univers, c'est la surface de ce ballon.

Cette surface est marquée par quantité de petits points noirs qui représentent les galaxies. Or, en gonflant le ballon, on observe que ces «galaxies» s'éloignent toutes les unes des autres. Mais en réalité, ce ne sont pas elles qui bougent, qui se déplacent, mais plutôt la surface du ballon qui s'étire.

Voilà ce qui se passe dans l'Univers, lorsqu'on a l'impression que toutes les galaxies s'éloignent les unes des autres — qu'importe d'où on les observe. (Toutefois, la réalité de l'Univers est plus complexe puisque l'éloignement des galaxies

se fait en trois dimensions, et non pas en deux dimensions comme à la surface d'un ballon gonflable.)

En outre, on voit qu'à la surface du ballon qui se gonfle, les «galaxies» s'éloignent les unes des autres selon une vitesse proportionnelle à leur distance. Mais en réalité, sur le ballon comme dans l'Univers, ces points sont immobiles. C'est l'espace qui s'étend. Et la longueur d'onde des photons suit le mouvement, elle s'étire, et la couleur du photon vire au rouge.

Voilà pourquoi on n'a pas ici affaire à un effet Doppler, mais bien à une déformation de l'espace — à l'expansion de l'Univers!

Un petit coin d'Univers ordinaire

Revenons maintenant à la Voie lactée où nous habitons. Pourriez-vous nous la décrire? À quoi ressemble notre galaxie?

Notre galaxie, c'est une galaxie «commune», comme d'ailleurs notre Soleil est une étoile «commune»... Comme vous le voyez, on se trouve toujours dans la moyenne.

Nous sommes dans une galaxie spirale, une spirale barrée, comme c'est le plus souvent le cas, puisque les galaxies spirales représentent la majorité des galaxies de l'Univers, tandis que parmi les spirales, les spirales barrées constituent la majorité des galaxies. Nous sommes donc dans la majorité — c'est-à-dire une galaxie spirale barrée très commune.

Qu'est-ce au juste qu'une galaxie barrée?

On sait que les galaxies sont formées de bras spiraux, comme on le voit si bien sur les images que nous transmet le télescope Hubble. Mais souvent, on observe au

centre des galaxies une barre d'étoiles — un bâton — d'où partent les bras spiraux. C'est le cas de notre galaxie.



Notre Galaxie, une belle spirale barrée. Au centre se trouve une barre constituée de milliards d'étoiles et qui mesure environ 10 000 années-lumière et à partir duquel partent deux bras spiraux. Notez aussi qu'au centre de la barre se trouve un bulbe... dans lequel se cache un trou noir.

Comme nous l'avons mentionné plus tôt, la Voie lactée est un disque très plat; la très grande majorité des étoiles – dont le Soleil – constituant les éléments qui forment ce disque.

Nous nous trouvons au centre de l'épaisseur du plan de la galaxie. C'est pourquoi ce que nous voyons depuis la Terre, c'est notre galaxie vue par la tranche.



Notre galaxie vue de profil.

On voit aussi beaucoup de poussière. Il y a en fait tant de poussière qu'on ne peut discerner le centre de la galaxie. Pour observer celui-ci, il faut le faire en infrarouge... Et c'est en infrarouge qu'on parvient à déterminer qu'il y a une barre au centre de notre galaxie.

La taille de notre galaxie, c'est 100 000 années-lumière tandis que nous, nous nous trouvons à 20 000 années-lumière du centre. [Voir l'illustration de la page 7.]

Nous habitons en banlieue, assez loin du centre de la galaxie... et non pas au centre – comme on l'a longtemps cru.

Notre galaxie se compose de 300 milliards d'étoiles, soit environ autant d'étoiles qu'il y a de neurones dans notre cerveau!

Et notre galaxie représente bien l'ensemble des autres galaxies?

Oui, puisque c'est une galaxie barrée, comme il y en a tant dans l'Univers.

Est-ce aussi le cas d'Andromède, notre voisine galactique?

On ne le sait pas trop puisqu'on la voit presque par la tranche, on n'arrive donc pas à voir s'il s'agit d'une galaxie barrée ou non. Par contre, la galaxie des chiens de chasse (Messier 51) est une galaxie spirale où il y a une toute petite barre au centre. Il y a aussi Messier 83 qui est une belle galaxie barrée qui ressemble assez à la nôtre.



Les galaxies [Messier 31](#) (Andromède), [Messier 51](#) (Tourbillon) et [Messier 53](#) (Moulinet austral).

Sait-on pourquoi certaines galaxies sont barrées et d'autres pas? Sait-on comment se forment ces barres d'étoiles?

Oui, on le sait depuis les années 1980, c'est-à-dire depuis qu'on dispose d'ordinateurs suffisamment puissants pour simuler la formation des galaxies.

Auparavant, nous avons conçu des modèles analytiques et, pour essayer de savoir comment se développent les bras spiraux des galaxies, il nous fallait faire beaucoup d'approximations. Et l'approximation principale qu'on faisait, c'était de supposer qu'au moment de la naissance d'une galaxie, ses bras spiraux devaient être très enroulés sur eux-mêmes – sans quoi, on n'était pas en mesure de faire des calculs. On a donc pris comme hypothèse de départ que toutes les galaxies devaient être très enroulées sur elles-mêmes. Et bien entendu, une barre d'étoiles, c'est quelque chose qui n'est justement pas en-

roulé sur lui-même; c'est même tout le contraire de quelque chose d'enroulée!

C'est pourquoi, avant les années 1980, on n'arrivait pas à concevoir qu'il puisse y avoir autant de galaxies barrées. On ignorait volontairement leur existence! On pensait même que les galaxies barrées étaient l'exception. Pourtant, dans les faits, les deux-tiers des galaxies sont barrées!

À partir des années 1980, on a procédé aux premières simulations numériques. On soumettait alors aux calculs de nos ordinateurs des points qui représentaient des étoiles et qu'on faisait interagir en simulant la force de la gravité. C'est alors qu'on a constaté que cette force forme rapidement des barres d'étoiles puis, ensuite, une belle spirale. C'est un processus spontané, une instabilité gravitationnelle spontanée. Voilà pourquoi la majorité des galaxies possède une belle barre d'étoiles en leur centre.

Des galaxies en forme de ballon de football

On distingue deux sortes de galaxies, dites-vous: les barrées et les non barrées. Y a-t-il d'autres sortes de galaxies?

Oui, il y a aussi des galaxies dites elliptiques. Ce sont des galaxies qui sont de forme sphéroïdale. Ce sont de grosses patates, un peu aplaties, mais beaucoup moins aplaties que la grande majorité des galaxies qui sont spirales. [On pourrait aussi dire que les galaxies elliptiques ont la forme d'un ballon de football américain.]

Les galaxies aplaties ont un facteur d'aplatissement de dix ou plus, tandis que les galaxies elliptiques ont un facteur de trois ou quatre seulement. Ce sont des patates [et non des pizza].



Exemple d'une galaxie elliptique: NCG 1132,

Notre galaxie mesure quelques 100 000 années-lumière de diamètre et possède un bulbe de 3 000 années-lumière d'épaisseur tout au plus. Le disque a pour épaisseur 1000 années-lumière. Par conséquent le «facteur d'aplatissement» de la Voie lactée est de l'ordre de 100. En outre, comme toutes les galaxies spirales, elle tourne sur elle-même – telle une pizza lancée en l'air – à raison d'un tour en 300 millions d'années environ.

Mais on ne savait pas comment se maintient l'équilibre des forces au sein des galaxies elliptiques et on ne parvenait pas non plus à mesurer leur période de rotation.

Or, justement, on a découvert qu'elles ne tournent pas ou très peu. Voilà pourquoi il ne s'agit pas de galaxies aplaties par la rotation, comme c'est le cas des galaxies en forme de disque. Les galaxies elliptiques sont en quelque sorte des cigares

ou des crêpes. Et on a fini par comprendre que leur étrange forme est due au fait qu'elles sont le résultat de la fusion de deux galaxies spirales.

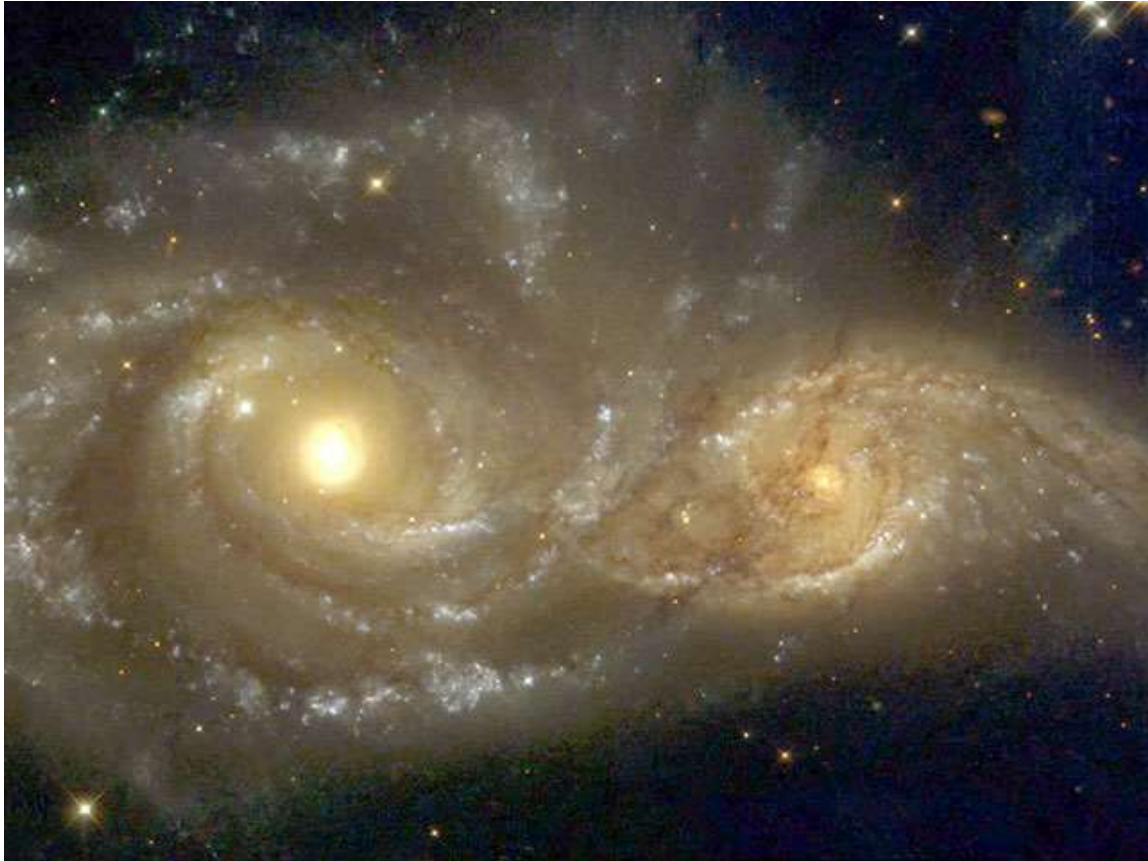
C'est ainsi qu'au départ, toutes les galaxies, riches en gaz, s'aplatissent en forme de disque. Mais certaines vont éventuellement se rencontrer et fusionner. Et dans certains cas, le moment cinétique des deux galaxies – le fait que chacune tourne sur elle-même – va s'annuler. Nous allons alors obtenir une galaxie elliptique... un beau cigare!

Existe-t-il des galaxies parfaitement sphériques?

Non, et nous savons pourquoi. Dans les simulations numériques que nous faisons sur ordinateur, on observe que toutes les galaxies qui se forment s'aplatissent nécessairement. Jamais une galaxie ne prend une forme sphérique, elles sont toujours aplaties et prennent la forme de sphéroïdes avec des axes inégaux.



Un autre bel exemple de galaxie elliptique, [NCG 3597](#), le résultat de la fusion de deux galaxies.



Deux gigantesques et majestueuses galaxies spirales, NGC 2207 et IC 2163, en pleine collision.

Collision entre galaxies

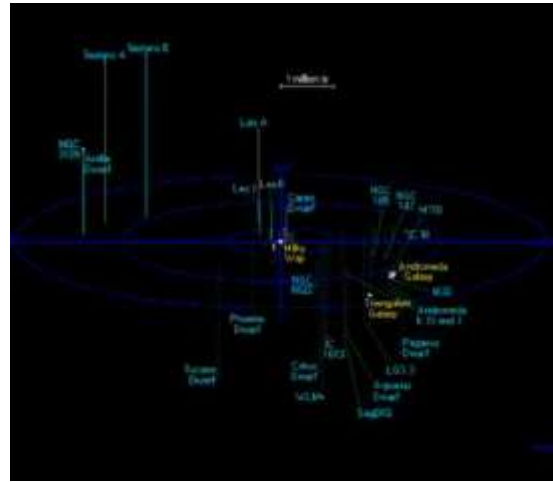
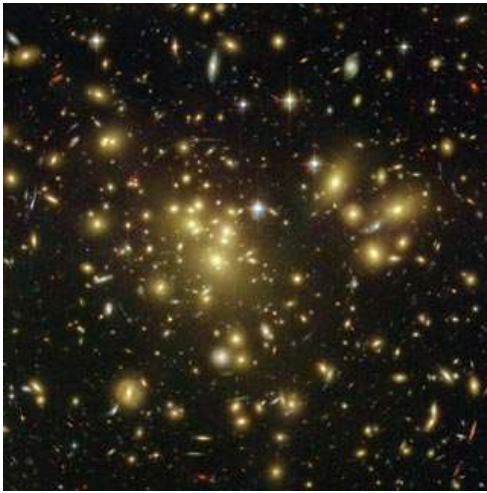
Vous venez de mentionner qu'il y a des galaxies qui entrent en collision les unes avec les autres. Voilà qui étonne lorsqu'on songe à la taille de l'Univers et au fait que les galaxies se trouvent à des millions d'années-lumière les unes des autres. Comment expliquer que puissent survenir des collisions entre galaxies? Et parfois même, on observe trois ou quatre galaxies entrant en collision en même temps! Comment est-ce possible?

C'est vrai que c'est une question qu'on pourrait se poser puisque, si les galaxies étaient réparties de façon homogène à travers l'Univers, elles ne devraient pas se rencontrer. Mais voilà, elles ne sont pas réparties uniformément.

En effet, lorsqu'on simule numériquement la formation de l'Univers à partir du Big Bang, on voit d'abord apparaître d'immenses filaments de matière cosmique et

beaucoup d'espace vide entre ces filaments. C'est par la suite que les galaxies se développent au sein de ces filaments. Elles se forment donc dans des régions de surdensité et se trouvent par conséquent assez proches les unes des autres. Certaines galaxies sont même liées gravitationnellement. Voilà pourquoi des galaxies finissent par se rencontrer et entrer en collision.

Amas de galaxies et Groupe local



À gauche, l'amas de galaxies Abell 1689, l'une des plus grandes concentrations de galaxies située à deux milliards d'années-lumière de nous. À droite, notre Groupe local de galaxies.

Au sein d'un filament, les galaxies se développent en groupe pour constituer ensuite des [amas de galaxies](#). Notre galaxie fait d'ailleurs partie d'un groupe qu'on appelle le [Groupe local](#) et qui comprend comme principales galaxies la nôtre (la Voie lactée), Andromède et la [Galaxie du triangle](#). En comptant toutes les galaxies naines, le nombre monte à une soixantaine.

Ce groupe s'étend sur une dizaine de millions d'années-lumière seulement et représente bien ce qu'est un petit groupe de galaxies. Quant à un amas de galaxies, c'est un regroupement beaucoup plus dense qui peut contenir des milliers de galaxies.

Comment se passe une collision entre galaxies? On pourrait imaginer que ça doit être catastrophique, une sorte de collision frontale. Mais ce n'est pas ce qui se passe, n'est-ce pas?

Ah non, ce n'est pas si catastrophique qu'on pourrait le penser, bien au contraire même, puisque les étoiles dont sont faites les galaxies ne se rencontrent jamais. Au sein d'une galaxie, les étoiles sont très distantes les unes des autres, elles sont comme des têtes d'épingle perdues dans l'immensité de l'espace. Par conséquent, jamais elles n'entrent en collision.

Notons ici que la Pr^e Combes parle des étoiles qui naissent isolément. Or, il arrive fréquemment que deux, trois ou quatre étoiles se forment au sein d'un même système stellaire – comme si dans notre Système solaire, il y avait eu une ou deux autres étoiles au côté du Soleil. Dans ce cas, des étoiles arrivent à se rencontrer et à fusionner. Par contre, jamais le Soleil n'entrera en contact avec le système stellaire voisin, [Alpha du Centaure](#) (lui-même composé de trois étoiles).

C'est ainsi que lors d'une collision entre galaxies, les étoiles passent les unes à côté des autres sans jamais entrer en contact, tant elles demeurent distantes. Lorsque deux galaxies se croisent, on les voit se fusionner tandis que leurs étoiles passent les unes à côté des autres... sans même se percevoir (gravitationnellement). [Voir cette [vidéo](#) de la NASA.]

Il n'y a que les nuages de gaz qu'on retrouve en abondance dans chaque galaxie qui entrent en collision. Ce sont essentiellement des nuages d'hydrogène qui se rencontrent et on observe alors des ondes de choc. On assiste aussi à la formation d'étoiles – et même à de véritables flambées d'étoiles – dans ces ondes de choc.

Deux galaxies qui se rencontrent, c'est comme deux ensembles de particules très dispersées qui passent l'un à travers l'autre?

C'est bien cela.

Deux galaxies qui se rencontrent fusionnent-elles nécessairement ou arrive-t-il qu'elles passent l'une à travers l'autre pour poursuivre ensuite leur course?

C'est rare, mais c'est possible. Cela arrive lorsque deux galaxies ont une vitesse relative plus grande que leur vitesse d'échappement, qui est de l'ordre de 500 kilomètres par seconde. Si donc la vitesse de collision entre deux galaxies dépassent les 500 km/sec, celles-ci poursuivront leur course après être passées proches l'une de l'autre.

Est-ce que toutes les galaxies se sont formées au début de l'Univers ou y a-t-il des galaxies qui se forment encore de nos jours?

Il y en a qui se forment encore mais la plupart des galaxies sont apparues au début de l'Univers.

Ce qui s'est d'abord formé, ce sont des galaxies noires, puisque la matière ordinaire se trouvait alors piégée avec la lumière. Les photons de lumière exerçaient alors une pression sur la matière ordinaire, l'empêchant de s'agglutiner (pour éventuellement former des étoiles). Ce phénomène s'est poursuivi jusqu'à ce que l'Univers se refroidisse, en atteignant la température de 3000 degrés Kelvin [2700 C]. Car au-delà de 3000 K, la matière se trouvait totalement ionisée.

Petit rappel de notions apprises à l'école. Les atomes sont constitués de [protons](#) (qui portent une charge électrique positive) et d'[électrons](#) (qui portent une charge électrique négative). Un proton est deux mille fois plus massif qu'un électron. Normalement, les deux s'unissent pour former des atomes.

Cependant, au début de l'Univers, les températures étaient si élevées que les protons et les électrons flottaient librement dans une sorte de soupe où aucun atome n'existait. C'est ce qu'on appelle la matière ionisée du début de l'Univers.

Mais avec le temps, l'Univers a pris de l'expansion et, par le fait même, la «soupe» s'est refroidie. C'est alors que les protons et les électrons ont pu s'associer pour constituer des atomes (de charge électrique neutre).

Les premiers atomes à se former ont été les plus simples: un proton s'est uni à un électron pour donner des atomes d'hydrogène. Ceux-ci sont aujourd'hui encore les plus abondants de l'Univers.

Quant au [photon](#), c'est un paquet d'énergie (un quantum) associé à la lumière. Étrangement, les photons n'ont

aucune masse et ils se comportent comme des ondes. (Mais ça, c'est une autre histoire...)

Il a fallu attendre environ 400 000 ans après le Big Bang pour que l'hydrogène se constitue. Or, cette matière neutre interagit beaucoup moins avec les photons de lumière. Et à partir de là, les photons n'empêchant plus la matière ordinaire de s'agglutiner, ce qui a mené à la formation des galaxies qu'on connaît.

Et est-ce que les galaxies sont éternelles? Est-ce qu'une galaxie peut finir par s'éteindre, par «disparaître»?

Tout dépend de ce qu'on entend par *la mort d'une galaxie*.

On peut considérer qu'une galaxie est morte lorsqu'il ne se forme plus d'étoiles dans son volume. Il y a ainsi des galaxies dont l'âge remonte au début de l'Univers et qui sont rouges. Ces galaxies sont appelées mortes par les astronomes. Mais elles sont toujours là, elles n'ont pas disparu. Cependant, il ne s'y forme plus d'étoiles.

Et il y a une autre sorte de mort. Celle-ci surviendra dans des milliards d'années, lorsque l'expansion de l'Univers, qui s'accélère de façon exponentielle, aura dilué toutes les structures et dissipé *toute* la matière! À ce moment-là, les galaxies auront disparu, plus rien n'existera plus et ce sera la mort complète de l'Univers...

L'Univers se sera en quelque sorte complètement évaporé, plus rien n'existera. Mais, mais cela n'arrivera que dans des centaines de milliards d'années, n'est-ce pas?

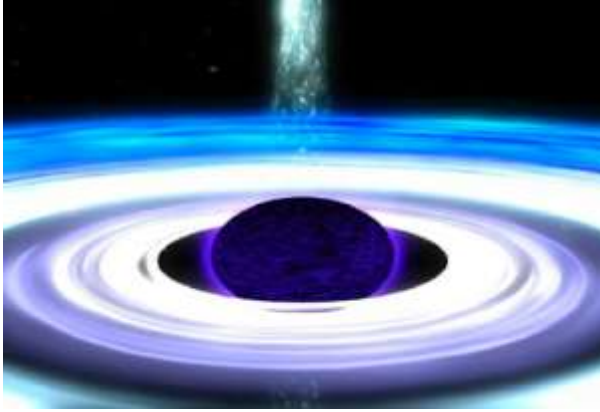
Ah oui, et même dans encore bien plus longtemps que ça! À vrai dire, on n'en sait rien, tant c'est dans un avenir extraordinaire lointain. On spéculé ici et il n'y a vraiment pas de quoi s'inquiéter.

Rappelons-nous que l'Univers est apparu il y a moins de 14 milliards d'années et que la Terre existe depuis cinq milliards d'années. Si l'Univers doit disparaître dans des *centaines* de milliards d'années – voire même bien davantage – c'est là un laps de temps inconcevable.

Trou noir super massif au centre de chaque galaxie

Un autre sujet d'inquiétude – et c'est une découverte que nous avons faite dans les années 1990 – c'est qu'il y a au cœur de la plupart des galaxies un trou noir.

Eh oui, et c'est le cas de la nôtre. On a en effet découvert qu'au centre de la grande majorité des galaxies se trouve un trou noir super massif. Par *super massif*,

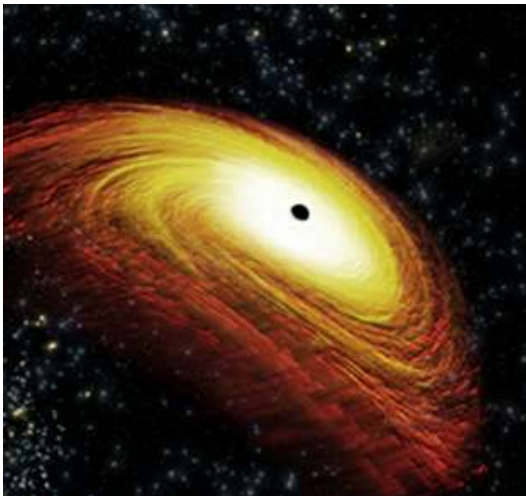


Représentation d'un trou noir

Un trou noir est en soi invisible et est *symbolisé* ici par une sphère noire que les cosmologistes appellent l'*horizon des évènements*, au-delà duquel il est impossible d'apercevoir quoi que ce soit. Heureusement que la matière qui s'agglutine autour du trou noir, avant d'être avalée, émet d'énormes quantités de radiations et d'énergie, tel qu'illustré.

on entend des trous noirs dont la masse équivaut à des centaines de millions de fois la masse du Soleil.

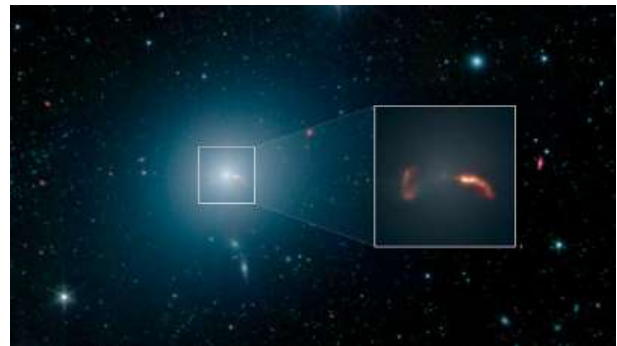
En général, la masse d'un trou noir super massif est proportionnelle à la masse du bulbe de la galaxie où il se forme. Donc, si dans une galaxie, il n'y a pas de bulbe, il se peut qu'il n'y ait pas non plus de trou noir super massif. Mais dès qu'il y a un petit bulbe, on retrouve un trou noir super massif.



Un trou noir 160 000 fois plus massif que le Soleil se cacherait au centre de cette galaxie située à 3,9 milliards d'années-lumière de nous.

C'est le cas de notre galaxie, qui possède un «petit» trou noir, dont la masse équivaut tout de même à 4 millions de fois celle du Soleil. D'autres galaxies, comme Messier 87, possèdent des trous noirs dont

la masse correspond à des *milliards* de fois la masse solaire. Ce sont des trous noirs gigantesques puisque le bulbe de ces galaxies est très gros.



Un immense trou noir a été repéré au centre de la galaxie [Messier 87](#).

Dans les médias, on nous présente souvent les trous noirs comme étant des monstres qui dévorent tout ce qu'il y a autour d'eux. Doit-on s'inquiéter de ce qu'il y ait un trou noir au centre de notre galaxie? Risquons-nous un jour d'être avalés par ce trou noir?

Ah non, pas du tout! Pas du tout, puisque le rayon d'action d'un trou noir est très limité. Par exemple, le rayon d'action du trou noir qui se trouve au cœur de notre galaxie – c'est-à-dire la région où sa force de gravité exerce un effet – n'est même pas de la taille du Système solaire. Or, on peut estimer que la taille

du Système solaire est inférieure à une année-lumière, ce qui correspond à une tête d'épingle à l'échelle de notre galaxie. Et nous, nous nous trouvons à quelques 20 000 années-lumière de ce trou noir.

En pratique, il faut s'approcher extrêmement proche d'un trou noir pour ressentir les effets de sa force de gravité. Il n'y a donc aucune crainte à y avoir, on ne sera jamais avalé par le trou noir au centre de notre galaxie.

Avez-vous été surpris lorsqu'on a découvert la présence d'un trou noir au centre de la plupart des galaxies, ou était-ce quelque chose à laquelle vous vous attendiez?

On s'y attendait puisque les trous noirs sont quelque chose de fréquent. On trouve d'ailleurs quantité de trous noirs de petite taille – de la taille de quelques masses solaires – partout dans les galaxies. Ceux-ci se forment à partir des grosses étoiles qui finissent leur vie en se transformant en trou noir. On savait donc qu'il y a des millions de petits trous noirs dans la Voie lactée. Mais ces trous noirs ne sont pas assez massifs pour parvenir à constituer de gros trous noirs. Il n'y a donc qu'un seul trou noir super massif par galaxie et celui-ci se trouve fatalement au centre.

La matière noire

On a mentionné plus tôt que les galaxies contiennent de la matière noire. Cette matière semble même être omniprésente et jouer un rôle fort important. Qu'est-ce au juste que la matière noire et quel est son rôle?

Alors là, je ne saurais répondre à votre première question, car la composition de la matière noire nous échappe complètement!

En réalité, on devrait plutôt parler de matière *transparente*. Il se peut même qu'on en ait autour de nous, vous et moi, en ce moment, dans la pièce où nous nous trouvons. Mais si on ne la voit pas, c'est que cette matière est totalement transparente, car tout passe au travers – y compris la lumière – comme s'il s'agissait d'un milieu parfaitement limpide. On qualifie cette matière de «noire» parce qu'elle ne rayonne pas. Mais elle n'absorbe rien non plus. De fait, cette matière n'interagit avec quoi que ce soit, y compris la lumière. Elle est *parfaitement* transparente.

Mais alors, pourquoi a-t-on besoin de prendre en compte une telle matière si

elle n'interagit avec absolument rien, si elle est parfaitement transparente?

Parce que si on ne la perçoit d'aucune façon, on détecte par contre les effets gravitationnels qu'elle exerce autour d'elle.

On sait par exemple que la matière – les étoiles, le gaz, notre Soleil, etc. – gravite autour du centre de la Voie lactée à une vitesse déterminée. Dans le cas du Soleil, celui-ci se déplace à la vitesse de 200 km/sec autour du centre de la galaxie. Or, cette vitesse est beaucoup plus élevée que si le Soleil tournait autour de la masse visible de la galaxie qu'on mesure.

Il faut ici savoir que la vitesse d'un corps céleste qui gravite autour d'un autre dépend entièrement de la masse de ce dernier. Par exemple, un engin spatial
--

doit se déplacer plus rapidement pour demeurer en orbite autour de la Terre que s'il gravitait autour de la Lune. De même, une sonde spatiale doit se déplacer à plus grande vitesse pour graviter autour du Soleil qu'un satellite autour de la Terre, etc.

C'est ainsi qu'en mesurant la vitesse de déplacement d'un corps céleste, on détermine facilement la masse de ce autour de quoi il gravite.

Or, dans le cas du Soleil, on constate qu'il se déplace beaucoup plus rapidement autour du centre de la galaxie que si celle-ci n'était constituée que de la matière qu'on détecte. Et fait étonnant, il manque même *énormément* de matière pour justifier la vitesse de déplacement des étoiles et du gaz à grande distance du centre de la Voie lactée.

On en déduit donc qu'il y a une masse manquante et ce, uniquement par l'effet gravitationnel qu'exerce le centre de la galaxie sur les étoiles lointaines.

Le premier qui a observé ce phénomène c'est [Fred Zwicky](#), un astronome d'origine suisse qui travaillait en Californie. Celui-ci a trouvé que, dans un amas de galaxies, la vitesse de déplacement de celles-ci était très grande, de l'ordre de 1000 km/sec. Or, il a calculé que pour que cet amas de galaxies se maintienne ensemble, il fallait énormément plus de masse que la matière visible. Selon Zwicky, il fallait *cent fois* plus de masse que la matière visible!

Il a donc été le premier à émettre l'idée qu'il devait exister énormément de matière transparente, une sorte de matière dont on ne sait pas de quoi elle est faite mais qui exerce une importante force de gravité. Depuis cette époque, nous avons trouvé une certaine quantité de matière visible que Zwicky n'avait pas vue: dans un

amas, le gaz très chaud (des millions de degrés) qui émet en rayons-X, représente dix fois plus de masse que celle des galaxies. Aujourd'hui, on sait que la matière invisible est seulement cinq fois plus importante que la matière visible.



Notre galaxie serait entourée d'une sorte de halo de matière transparente, ici représentée en bleu, qu'on ne peut d'aucune façon détecter, si ce n'est que par l'effet gravitationnel qu'elle exerce sur la matière visible.

À cette époque, on pensait que la masse manquante devait être constituée de matière ordinaire, faite de protons, de neutrons, etc. Jusqu'en 1985, on imaginait une matière noire faite de ce qu'on appelle des baryons, c'est-à-dire la matière ordinaire dont nous sommes faits.

Mais, cette année-là (1985), on a réalisé que ce ne pouvait être le cas puisque s'il s'était agi de matière ordinaire (baryonique), les galaxies qu'on connaît n'existeraient pas!

C'est en effet à partir des années 1980, grâce à des télescopes spatiaux précurseurs, comme [COBE](#), [WMAP](#) et [Planck](#), qu'on a entrepris de mesurer ce que les astronomes appellent le «[fond diffus cosmologique](#)». Simplement dit, ce «fond» est en quelque sorte tout ce qui reste du Big Bang survenu il y a plus de treize milliards d'années.

Or, ce «fond» présente d'infimes variations de température et d'intensité

qui permettent aux astronomes de recueillir quantité d'informations au sujet de la structure, de l'âge et de l'évolution de l'Univers.

En observant quelles étaient les premières fluctuations de densité qui sont survenues au début de l'Univers – avant même que les galaxies ne se forment –, on a observé que ces fluctuations sont seulement de 1 pour 100 000, ce qui est très peu. Le fond diffus est donc très homogène. Or, voilà qui nous pose de sérieux problèmes.

En effet, étant donné cette extraordinaire homogénéité, il aurait fallu beaucoup plus de temps pour que les galaxies se forment. Selon ce qu'on comprend, les galaxies qu'on connaît... ne devraient pas encore exister!

Voilà comment entre en scène la matière *noire*, une matière parfaitement transparente.

C'est en effet en 1985 qu'on a compris qu'il fallait quelque chose qui soit totale

ment différent de la matière ordinaire pour expliquer l'Univers tel qu'on l'observe. Mais quelle est la nature de cette matière noire? On n'en sait rien! Pour le moment, on a imaginé quantité de possibilités mais on n'observe aucune d'entre elles dans la réalité. On peut dire que la cosmologie est en crise.

Nous constatons donc les *effets* de la présence d'une matière transparente – on en constate l'existence – mais on ne sait pas de quoi elle est faite.

Pour vous qui vous passionnez pour les galaxies, est-ce que c'est là la grande question de l'heure, ou y a-t-il autre chose qu'on cherche à comprendre, à découvrir, à savoir?

Oh, il y a encore énormément de choses à découvrir et à comprendre! Mais cette matière transparente, ça fait tout de même des dizaines d'années qu'on l'a repérée mais on demeure incapable de cerner de quoi il s'agit au juste.

Comment naissent les galaxies?

Entre-temps, on s'intéresse à quantité d'autres questions. Par exemple, on aimerait bien savoir comment naissent, vivent et meurent les galaxies.

On sait qu'il y a d'immenses nuages de matière qui se sont formés au tout début de l'Univers, durant le premier milliard d'années. On pensait jadis que le processus de formation des galaxies se faisait du bas vers le haut, c'est-à-dire que les galaxies se sont constituées graduellement; au début, il y avait de petites structures qui ont fusionné les unes aux autres pour donner lieu à des structures de plus en plus grandes.

C'est d'ailleurs ce qui s'est passé avec la matière noire. Lorsqu'on fait des simu-

lations sur ordinateur, on obtient de petites galaxies noires qui se forment et qui fusionnent peu à peu pour finir par former de grands amas de galaxies.

Par contre, pour la matière visible, c'est le contraire qu'on observe: d'après nos simulations, de grosses galaxies se sont formées au début de l'Univers, tandis qu'aujourd'hui, tout ce qui se développe, ce sont des galaxies naines. On a donc là un paradoxe.

En collision avec Andromède

Notre galaxie, c'est une galaxie dans la fleur de l'âge, n'est-ce pas?

Eh oui, puisqu'il s'y forme encore une ou deux étoiles par an. Mais ce n'est toutefois pas beaucoup puisqu'il y a des galaxies où se forment des étoiles à coup de mille par an. Notre galaxie est très tranquille.

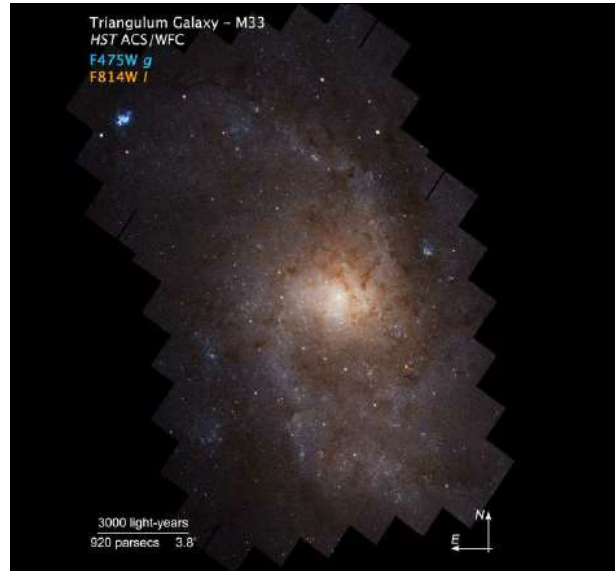
Elle fait partie du [Groupe local](#) de galaxies, avec la très grosse galaxie d'Andromède ainsi que la galaxie du Triangle. Il s'agit d'un tout petit hameau qui évolue lentement.

Éventuellement, nous allons fusionner avec notre voisine Andromède, ce qui fera une galaxie encore plus grosse. Cela surviendra dans quelques deux à trois milliards d'années.

Ce sera spectaculaire de voir venir Andromède s'approcher de nous, mais ça se produira dans des milliards d'années.

On verra un paysage beaucoup plus joli que ce qu'on a avec la Voie lactée.

Ce qui est amusant, lorsqu'on fait un tour d'horizon de l'histoire de l'astronomie et de l'histoire de l'humanité, c'est de constater que nous nous croyons toujours au centre de l'Univers – on a même à chaque fois de bonnes raisons de le penser – alors qu'en réalité, on occupe un espace quelconque, sur une planète ordinaire, qui gravite autour d'une



La [Galaxie du triangle](#), le troisième membre en importance du Groupe Local (après Andromède et la Voie lactée). Elle pourrait contenir quelques 100 milliards d'étoiles.

étoile ordinaire, en périphérie d'une galaxie ordinaire. Nous sommes tout, sauf exceptionnel!

Voilà. On est tout à fait ordinaire et je préciserai même que, dans la distribution de masse des galaxies, la Voie lactée se trouve exactement au centre. Et rien de plus normal puisque la probabilité qu'on se trouve dans le groupe des galaxies les plus nombreuses – et au beau milieu de ce groupe – est la plus élevée.

Deux grands mystères à résoudre: énergie noire et quintessence

Il y aurait encore beaucoup de choses à ajouter. Par exemple, on n'a pas encore parlé de tout ce qui constitue l'Univers.

Or, l'ensemble des observations que nous avons accumulées depuis une vingtaine d'années nous indique que l'Univers est constitué de 5% de matière ordinaire, de 25% de matière transparente... et de 70% d'énergie noire.

Or, on s'est aperçu en 1998 que les galaxies lointaines sont beaucoup plus distantes de nous qu'on l'avait estimé de par la loi d'expansion de Hubble.

Les astronomes ont en effet constaté, à leur stupéfaction, que les galaxies lointaines sont beaucoup plus distantes de nous qu'ils l'estimaient auparavant. Tout se passe comme si l'expansion de l'Univers s'était faite plus rapidement que nos théories l'indiquent.

Jusqu'à récemment, on considérait qu'il y a eu un immense Big Bang il y a 13,7 milliards d'années et que depuis, l'expansion de l'Univers se décélère progressivement, ralentie par toute la masse et la force de gravité correspondante. Mais il semble que ce n'est pas du tout ce qui se passe. En fait l'expansion s'accélère, et de plus en plus!

On a donc dû se rendre à l'évidence que l'expansion de l'Univers s'est accélérée au fil du temps. Or cela, ça été une énorme surprise pour nous.

Ceci met en évidence qu'il existe un composant, une énergie, qui a une force de répulsion (et non d'attraction, comme la matière), une énergie qui accélère l'expansion de l'Univers. On l'appelle l'énergie noire. Mais on ne sait pas du tout – mais vraiment pas! – de quoi est faite cette énergie noire.

Nous avons traité de l'énergie noire dans le balado 44, [Matière et énergie](#)

[noires](#), une entrevue avec l'astronome Jean-René Roy diffusé en avril 2020.

Comme les astronomes sont très inventifs, ils imaginent sans cesse des tas de théories. Mais la plupart de celles-ci sont rapidement éliminées puisqu'elles ne concordent pas avec les observations qu'on fait.

Parmi les hypothèses qui circulent, certaines remettent en cause les forces fondamentales, dont la gravité! En conséquence, les équations d'Einstein pourraient devoir être modifiées puisqu'elles ne prévoient pas l'expansion accélérée de l'Univers. (Par contre, rassurons-nous, la gravité s'applique et s'appliquera toujours à l'échelle du Système solaire. On n'a donc pas de soucis à se faire dans notre quotidien, puisque tout demeure comme avant.)

La gravité modifiée pourrait rendre compte à la fois de l'énergie noire et de la matière noire.

De quoi pourrait être faite l'énergie noire? On a longtemps pensé qu'elle pourrait être constituée de particules qu'on appelle [wimp](#) – pour *Weakly interacting massive particles*, particules massives interagissant faiblement. Le wimp, pose-ton, serait une particule qui aurait cent fois la masse du proton mais qui n'interagirait aucunement avec la matière ordinaire (baryonique). [Jean-René Roy en parle dans le [balado 44](#).]

C'était là un candidat idéal qu'on cherche à repérer un peu partout et de toutes les manières. Ainsi, on a tenté de repérer des wimps à l'aide de détecteurs placés profondément sous terre. Mais ça fait une bonne trentaine d'années qu'on cherche et qu'on ne trouve rien. Il y a donc un problème.

De même, on aurait dû détecter des wimps dans les grands accélérateurs de particules, comme le LHC (*Large Hadron Collider*), le [Grand collisionneur de hadrons](#) du CERN. Dans ce collisionneur, on fait se rencontrer face à face deux faisceaux de protons et, à l'échelle de cette collision, on obtient des quantités d'énergie énormes. On produit en quelque sorte de petits «big bang» en générant autant d'énergie par particules qu'il y en a eu au moment du Big Bang.

On produit donc assez d'énergie pour créer des wimps – c'est-à-dire pour créer des particules qui auraient cent fois la masse du proton. On parvient même à créer des particules qui ont mille fois la masse du proton. Mais hélas, on n'obtient jamais de wimps. Pas un seul!

On est par conséquent en crise, puisque notre principal candidat pour expliquer la nature de l'énergie noire – le wimp – ne nous apparaît jamais.

Autre mystère. On ne sait pas encore si l'énergie noire pourrait représenter une constante cosmologique, ou bien si son comportement est dynamique et évolue dans le temps. Si c'est le cas, et que son comportement est dynamique, alors elle pourrait être le cinquième élément qu'on appelle [quintessence](#). Les quatre autres éléments connus dans l'Univers sont les [baryons](#), les [leptons](#) (ou [neutrinos](#)), la matière noire (faite de particules en dehors du modèle standard des particules) et les photons.

Douze milliards de galaxies à étudier

Enfin l'Agence spatiale européenne va lancer en 2022 un nouveau télescope spatial appelé [Euclid](#). Or, ce télescope a justement pour mission de traquer l'énergie noire. [Voir le site [Euclid](#) de l'ESA.]

Grâce à ce télescope, on repérera des quantités phénoménales de galaxies – jusqu'à 12 milliards – en établissant leur distance, leur vitesse, etc.

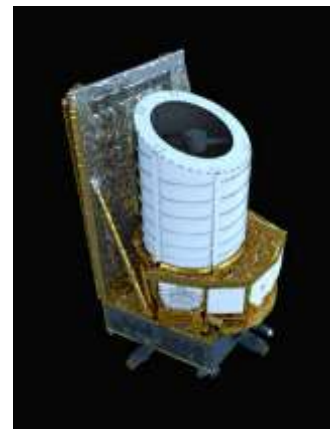
Actuellement, on dispose d'un important relevé de galaxies, qui s'appelle le [Sloan Digital Sky Survey](#) (le Relevé numérique du ciel Sloan), qui recense des millions de galaxies. Ce répertoire a marqué un progrès considérable puisque le principal relevé précédent rassemblait les caractéristiques de cent mille galaxies. Mais grâce à Euclid, on espère recenser des milliards de galaxies.

Avec 12 milliards de galaxies, on devrait pouvoir étudier plus précisément l'expansion de l'Univers et déterminer si elle s'est accélérée au fil du temps et, si oui, à partir de quand. Pour l'instant, on ne sait pas

si l'expansion s'est faite de manière constante ou si elle a varié dans le temps. S'agit-il d'une constante cosmologique ou non?

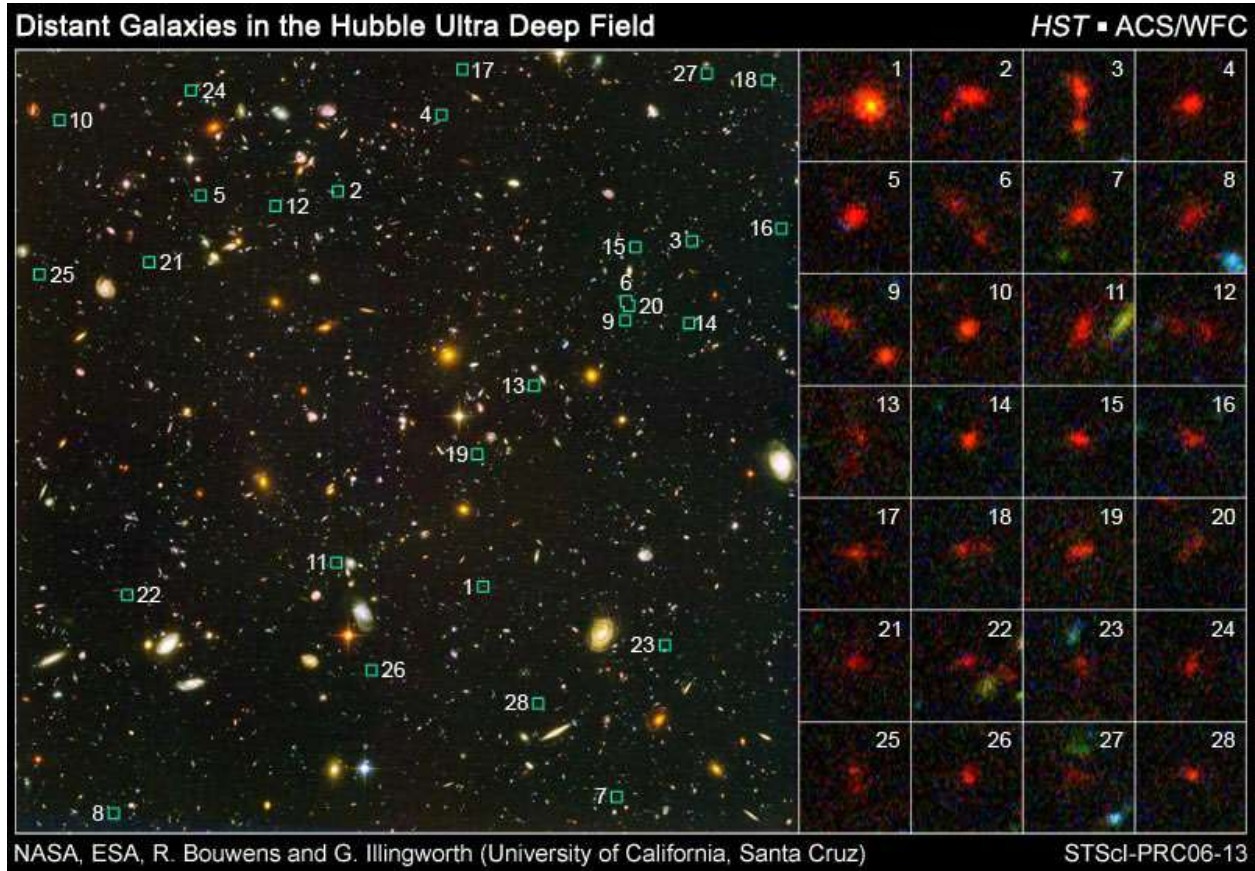
En plus, une fois qu'on aura résolu ce problème – espérons-le –, on aura 12 milliards de galaxies à se mettre sous la dent! Pour ceux et celles qui se consacrent à la physique des galaxies, ce sera un outil formidable.

Pour vous, ce sera un coffre au trésor extraordinaire...



Le télescope spatial Euclid.

Extraordinaire en effet. Ce sera un progrès remarquable. Et comme vous voyez, la science progresse de façon exponentielle.



Ce cliché pris par Hubble montre une belle diversité de galaxies, dont 28 nous sont montrées en détail.

