

**VOYAGE  
DANS  
L'ESPACE**

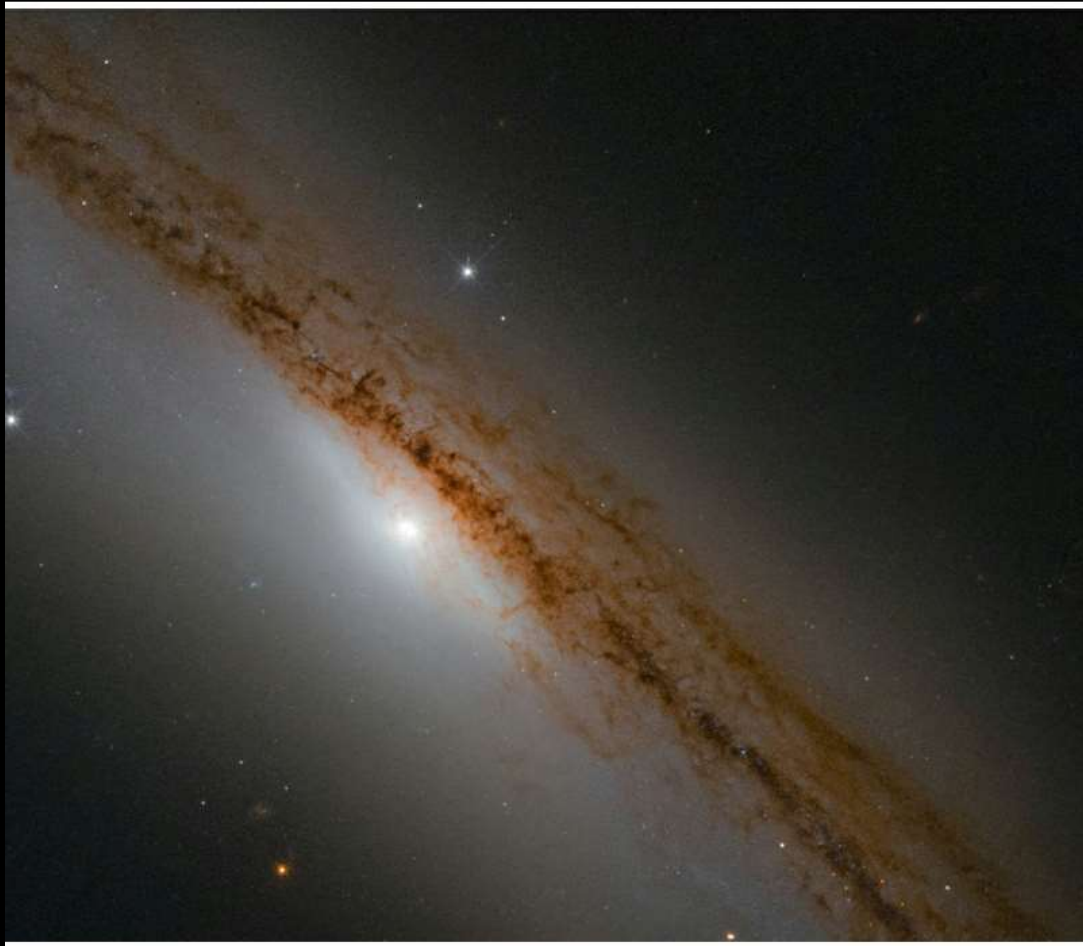
Épisode

44

---

LA MATIÈRE ET ÉNERGIE «NOIRES» DE L'UNIVERS

---



Le 95% de l'Univers qu'il nous resterait à découvrir

## 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 Jean-René Roy  
Couverture: Mathieu Rancourt  
Illustrations: NASA, ESO

Balado: <https://soundcloud.com/voyage-danslespace/>  
Abonnement:  
<https://www.patreon.com/voyagedanslespace>  
Facebook: <https://www.facebook.com/voyagedanslespace/>

Courriel: [claude-lafleur1@videotron.ca](mailto:claude-lafleur1@videotron.ca)

© Copyright, Claude Lafleur, 2020

ISBN 978-2-923275-98-7 (pdf)

ISBN 978-2-923275-99-4 (kindle)

Dépôt légal: Bibliothèque nationale du Québec, 2020

Dépôt légal: Bibliothèque nationale du Canada, 2020



Photo: Alan Dyer

## La matière et énergie «noires» de l'Univers

### Le 95% de l'Univers qu'il nous resterait à découvrir

Écoutez le balado *La matière et l'énergie «noires»* diffusé le 5 avril 2020.

Aujourd'hui, nous vous parlerons de ce qu'on appelle communément la «matière noire» et l'«énergie noire». On part de l'idée que l'Univers que nous connaissons et qu'on observe ne constituerait qu'environ 5% de tout ce qui existerait! C'est donc dire que 95% de l'Univers ne serait pas composé de matière visible – celle qui nous est familière, faite principalement de protons, de neutrons et d'électrons.

Voilà donc ce dont on parlera avec un astronome professionnel: Jean-René Roy. Mais avant d'aborder ce sujet, j'aimerais que celui-ci nous raconte comment il est devenu astronome, ce qui a fait qu'un jour, il a décidé de faire carrière en astronomie.

*Comment suis-je devenu astronome?* Cela n'est pas arrivé tout d'un coup puisque pour moi, ça s'est fait graduellement. Je dirais que j'ai eu mon «premier éclair» à 9 ans: c'était tard à l'automne et je revenais chez moi, probablement de l'épicerie de mon père. Nous habitions alors la pe-

tite ville d'Acton Vale, dans les Cantons de l'est, à une centaine de kilomètres à l'est de Montréal.

En marchant, tout à coup, j'ai eu sous les yeux un ciel magnifique! J'ai vu une série d'étoiles (probablement la Grande ourse et Cassiopée) et je me suis dit qu'il y avait là quelque chose qui m'émerveillait et que j'aimerais bien comprendre. C'est alors que je me suis dit que je deviendrais un «savant». Je connaissais la notion de savant, mais à 9 ans, je ne savais pas que des savants se consacraient à l'étude des étoiles.

Et puis s'est produit un deuxième éclair. J'étais pensionnaire au Mont Sacré-Cœur, à Granby. C'était l'automne de 1957 lorsqu'a été lancé Spoutnik 1. À cette époque, les frères qui nous enseignaient découpaient des pages de journaux qu'ils affichaient sur un babillard. Je me souviens donc avoir lu que les «méchants» Russes avaient mis en orbite un satellite.

Sur le champ, j'ai plus ou moins compris ce que cela pouvait signifier. J'ai donc demandé aux frères autour de moi de m'expliquer. Mais finalement, je me suis rendu compte que j'en comprenais peut-être davantage

qu'eux! En fait, après quelques semaines, c'est moi qui expliquais ce qui se passait.

C'est donc dire que si, pour beaucoup de scientifiques d'aujourd'hui, le moment clé pour eux a été la mission Apollo 11, en juillet 1969; pour moi, ce fut le Spoutnik 1 de 1957 qui a été le déclencheur de ma carrière scientifique. Je suis, peut-on dire, un «adolescent Spoutnik»!

**Nous sommes des exemples de l'influence d'évènements scientifiques ou géopolitiques qui peuvent stimuler des jeunes à faire carrière en science. Ainsi, parfois, on se demande à quoi sert d'explorer l'espace? Eh bien, ça sert entre autres à convier des jeunes vers des carrières scientifiques – et pas nécessairement reliées au domaine spatial.**

**Et la question de la matière et de l'énergie »noires», c'est un sujet que vous connaissez assez bien, n'est-ce pas?**

À noter que Jean-René traite de la matière sombre dans son plus récent ouvrage: *Trente images qui ont révélé l'univers.*



Claude Lafleur, Mathieu Rancourt et Jean-René Roy lors de l'enregistrement de ce balado.

Disons que je connais ce sujet autant qu'il peut être connu par un professionnel comme moi. Je ne suis toutefois pas impliqué dans des expériences qui cherchent à déterminer quel type de particules pourrait constituer cette fameuse matière sombre. Je dirais que ce sujet me fascine du point de vue de l'épistémologie, c'est-à-dire comment connaît-on l'Univers?

Or, cette «matière noire» est très intrigante. C'est quelque chose du domaine de l'hypothèse scientifique, puisqu'on n'a pas identifié ce dont il s'agit. Comme on le verra, on a élaboré des scénarios qui tentent d'expliquer ces deux concepts que sont la matière sombre et l'énergie noire. Et c'est cet aspect d'interrogation et de recherche qui m'intéresse.

Ajoutons que, comme astronome de terrain, je m'intéresse davantage à la matière normale qu'on connaît tous et qu'on appelle la matière *baryonique*,

matière faite de neutrons, de protons et d'électrons et dont nous sommes nous-mêmes faits, ainsi que les planètes, les étoiles... et même les trous noirs.

### **Matière baryonique**

Toute la matière que nous voyons dans l'Univers se compose de deux grandes familles de particules fondamentales: les leptons et les hadrons. Ces dernières rassemblent deux sous-groupes de particules: les baryons et les mésons. Or, la matière à laquelle nous sommes habitués est principalement faite de baryons; c'est pourquoi on parle de *matière baryonique*. Il s'agit de la matière qu'on voit partout autour de nous et dont nous sommes faits.

## **Première partie: l'Univers qu'on connaît**

Commençons donc par parler de l'Univers visible, celui que nous voyons au firmament lorsque nous regardons le ciel. Il s'agit aussi de l'Univers que nous voyons dans les livres d'astronomie et que nous montrent le télescope Hubble ainsi que tous les autres télescopes au sol. De quoi est donc fait l'Univers visible que nous connaissons?

L'Univers est fait de la matière «normale», pourrait-on dire. Ce peut être du gaz (comme l'air qu'on respire, le propane qu'on brûle), du solide (comme un métal ou des cailloux) et sous forme liquide (comme l'eau et l'alcool). Puis, lorsque la matière est portée à très haute température, elle prend la forme d'un gaz extrêmement chaud qu'on appelle le plasma — état

de la matière où tous les atomes sont détachés les uns des autres, tout comme dans un gaz. Mais dans tous les cas, retenons que cette matière se compose de protons, de neutrons et d'électrons.

La matière solide, c'est par exemple notre Terre, composée en grande partie de silicium, d'oxygène, d'aluminium et autres éléments chimiques.

## Les quatre états de la matière: une question de température

La matière qui nous est familière (la matière baryonique) se compose d'atomes, qu'on pourrait assimiler à des boules de billard faites de protons, de neutrons et d'électrons et qui s'entrechoquent les unes avec les autres. L'énergie avec laquelle ces atomes s'entrechoquent dépend de la température dans laquelle ils baignent.

L'eau nous offre un bel exemple. Chaque molécule d'eau est composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène ( $H_2O$ ). Chaque atome d'hydrogène est constitué d'un proton et d'un électron, tandis qu'un atome d'oxygène compte huit protons, huit neutrons et huit électrons.

À une température inférieure à 0 degré Celsius, les molécules d'eau s'entrechoquent relativement peu violemment, de sorte qu'on a affaire à de la matière solide: de la glace. Mais si on porte la température de l'eau au-delà de 0°, l'énergie qu'on confère aux «boules de billard» fait qu'elles s'entrechoquent suffisamment violemment pour devenir un matériau fluide: de l'eau liquide. Et

si on porte la température de l'eau à plus de 100°, les molécules s'entrechoquent si violemment que la matière s'évapore: l'eau devient de la vapeur, c'est-à-dire un gaz.

On observe le même phénomène pour toute autre matière: si on porte à température suffisamment élevée un caillou ou une barre de fer, ils deviendront dans un premier temps liquides, puis éventuellement gazeux. C'est ce qui se passe au cœur de la Terre où la matière rocheuse et ferreuse se trouve sous forme liquide.

Il existe un quatrième état de la matière: le plasma. Dans ce cas, la matière possède tant d'énergie que les atomes perdent un ou plusieurs électrons. Il faut cependant des températures extrêmement élevées (plusieurs millions de degrés), températures qu'on retrouve au cœur du Soleil.

Celui-ci est de fait une boule de plasma, tandis qu'une planète comme la Terre est une boule de matière solide, avec très peu de matière liquide (les océans) et gazeuse (l'atmosphère).

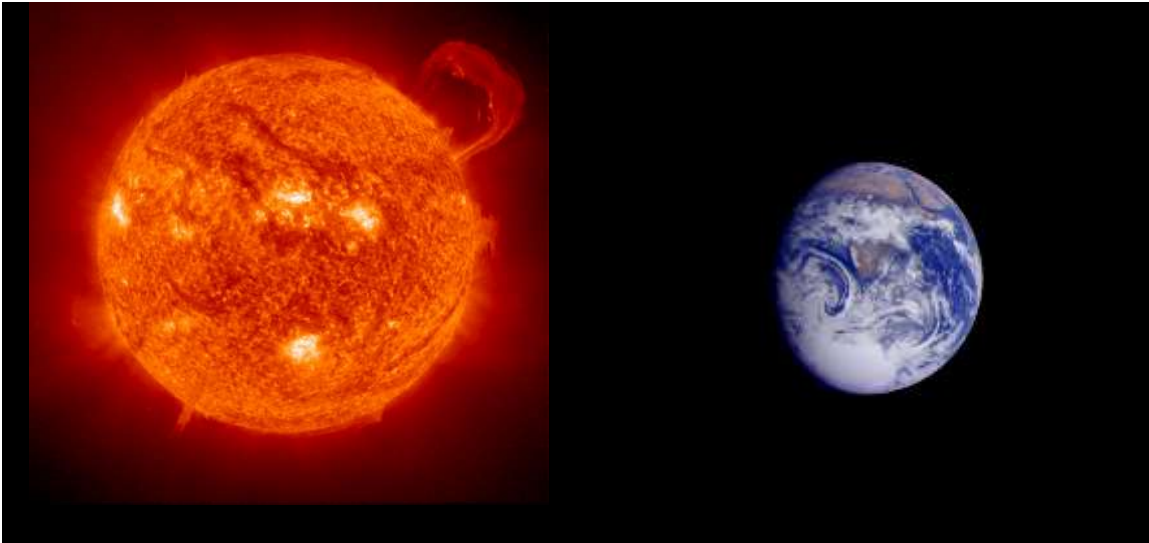
Cette matière rocheuse constitue ce qui nous est familier. Mais lorsque les températures et pressions sont grandes, cette matière devient «plastique» puis se liquéfie. C'est probablement le cas dans le manteau et au centre de la Terre où la matière qu'on trouve solide à la surface de notre planète devient alors «liquide»; elle

bouge et est responsable de la tectonique des plaques (ou «dérive des continents»). C'est aussi le cas des autres planètes, dont la plupart ont au moins une partie solide.

On parle aussi de l'état liquide, dont l'eau sur Terre. On pense généralement que notre planète dispose de beaucoup d'eau mais, en réalité, il y

en a très peu. Dans les faits, au sein du Système solaire interne, les planètes ne sont pas parvenues à conserver l'eau qu'elles possédaient au départ; ainsi, l'eau sur Terre a été apportée par d'autres corps célestes en provenance du Système solaire extérieur.

Ces objets célestes (astéroïdes et comètes), qui ont gardé leur eau sous forme de glace primitive, nous sont tombés dessus durant le premier milliard d'années de l'histoire de la Terre. Ce sont eux qui ont apporté l'eau dont on dispose à présent sur Terre, et possiblement celle sur Mars.

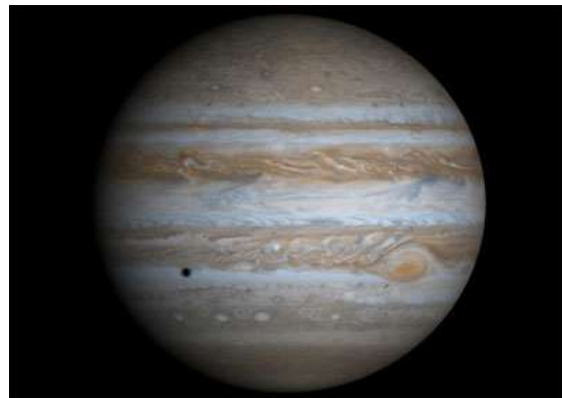


Le Soleil est une boule de plasma, tandis que la Terre est essentiellement un astre de matière solide, avec un peu de liquide (les océans) et de gaz (l'atmosphère). (Notez qu'ici, les deux astres ne sont pas à l'échelle puisque le Soleil est 109 fois plus gros que la Terre.)

## Un Univers d'hydrogène, d'hélium et de plasma

Lorsqu'on se déplace vers l'extérieur du Système solaire, on retrouve des planètes géantes, des astres avant tout gazeux. Ces planètes sont essentiellement constituées d'hydrogène et d'hélium; elles ont la même constitution que les étoiles. Les éléments solides sont probablement assemblés dans un noyau central, dont on extrapole les propriétés par des modèles théoriques.

C'est ainsi que l'hydrogène et l'hélium sont les deux éléments chimiques les plus abondants de l'Univers. Lorsqu'on compte les atomes présents



Jupiter, une boule de gaz de 143 000 km. (La Terre 12 750 km; le Soleil 1 400 000 km.)

dans l'Univers, environ 92% sont des atomes d'hydrogène et 6% ou 7% sont des atomes d'hélium. Le petit pourcentage qui reste, ce sont tous les éléments du Tableau périodique des éléments chimiques!

# Tableau périodique des éléments

Numéro atomique: 6  
 Symbole de l'élément: C  
 Masse atomique: 12,011  
 Nom: Carbone

Les couleurs du tableau indiquent les groupes suivants :

- Métal (bleu)
- Métal de transition (rouge)
- Non-métal (jaune)
- Gaz rares et autres (vert)

\* Signifie élément radioactif (instable)

Admirez le tableau de tous les éléments qui forment l'Univers: les atomes des deux premiers éléments, l'hydrogène et l'hélium, constituent à eux seuls plus de 98% de tous les atomes qu'on retrouve dans l'Univers. Puis, les 92 éléments suivants représentent moins de 2% des atomes de l'Univers. (Les 24 derniers éléments sont fabriqués en laboratoire et n'existent donc pas à l'état naturel.)

Jupiter est constituée d'hydrogène et d'hélium, comme les étoiles. On pourrait dire qu'il s'agit en quelque sorte d'une étoile manquée. En pratique, cette planète n'est pas assez massive pour avoir permis en son centre les réactions thermonucléaires et briller comme une petite étoile. Il aurait fallu qu'elle soit une dizaine de fois plus massive pour générer une température centrale proche de celle qu'on retrouve au cœur des étoiles – c'est-à-dire que Jupiter aurait dû avoir au moins 10% de la masse du Soleil.

Grâce à sa masse suffisamment élevée, on trouve au sein du Soleil un gaz extrêmement chaud qui se tient ensemble par la force de gravitation et qui forme ce qu'on appelle une étoile.

Au centre, une sorte de fournaise thermonucléaire à 15 millions de degrés génère l'énergie et la lumière dont dépend toute vie sur Terre.

Or, cette matière ultra-chaude – du plasma – c'est ce qui constitue en grande partie les objets visibles de notre Univers, c'est-à-dire l'ensemble des étoiles.

**L'essentiel de la matière que nous connaissons se retrouve donc au sein des étoiles ?**

En effet. Bien sûr, il y a différentes sortes d'étoiles, certaines sont plus massives que notre Soleil, mais elles sont rares, tandis que la majorité (90%) sont moins massives que le Soleil.

La plupart des étoiles ont autour d'elles un cortège de planètes, donc de la matière solide, liquide ou gazeuse comme sur la Terre et Jupiter. Mais il s'agit essentiellement de systèmes d'astres où pratiquement toute la masse est contenue au centre – dans l'étoile – alors qu'un millième de la masse se trouve en périphérie de l'étoile; cela constitue une sorte de petite «pollution» interplanétaire à laquelle nous appartenons.

### Répartition de la matière composant le Système solaire

Le Soleil	99,85 %
Les planètes	0,135 %
Les comètes	0,01 %
Satellites naturels	0,00005 %
Les petites planètes	0,0000002 %
Les météoroïdes	0,0000001 %
Matière interplanétaire	0,0000001 %

**Tout compte fait, au sein de notre Système solaire, 99,9% de la matière est concentrée dans le Soleil, et le petit peu qui reste forme les planètes et tout ce qu'on retrouve autour de notre étoile. Les étoiles constituent donc l'essentiel de toute la matière qu'on observe dans l'Univers.**

### Des galaxies en forme de pizza

Les étoiles se rassemblent dans de grands systèmes qu'on appelle des galaxies. Dans notre cas, on parle de la Voie lactée. Lorsque vous avez la chance d'être sur un site où on retrouve un ciel très obscur, la longue bande lumineuse qui traverse le ciel de part en part, c'est la Voie lactée. C'est

le grand système stellaire auquel le Soleil et le Système solaire appartiennent.



La partie centrale de la Voie Lactée vue de l'observatoire radioastronomique ALMA situé au nord du Chili. (Crédit: European Southern Observatory.)

On peut dire que la plupart des galaxies ont la forme de pizza; on les appelle des *spiraies*. L'autre grande classe est celle des elliptiques qui ont la forme de ballons. Notre galaxie est une spirale; elle fait environ 100 000 années-lumière de diamètre et a une épaisseur de quelques milliers d'années-lumière seulement. Et le tout tourne autour d'un centre de masse, où se trouve assez fréquemment un trou noir de très grande masse – des millions, voire des milliards de fois celle du Soleil.



Deux représentations de notre galaxie, la Voie lactée. À gauche, la galaxie vue d'au-dessus, faisant ressortir les deux bras recroquevillés en spirale. Ci-dessus: la galaxie vue par la tranche, qui fait ressortir sa minceur; la Voie lactée a de fait les proportions d'un disque CD! (Crédit: NASA et ESO)

Ce système tourne sur lui-même en fonction des lois de Newton, ce qui en fait un système très stable. Nous, nous nous trouvons à environ 25 000 années-lumière du centre de la galaxie et il nous faut environ 250 millions d'années pour accomplir un tour complet autour du centre de la Voie lactée.

Absolument, comme une toupie, sauf que les différentes parties de la galaxie se déplacent à des vitesses différentes. Ainsi, lorsque vous êtes proche du centre, vous tournez relativement rapidement. C'est la même chose qu'on observe au sein du Système solaire; les planètes qui gravitent près du Soleil, comme Mercure et Vénus, tournent plus rapidement autour du Soleil que celles qui se trouvent à grandes distances, par exemple Neptune et Pluton.



Notre position par rapport au centre de la galaxie.

**Notre galaxie tourne sur elle-même à la manière d'une toupie, n'est-ce pas?**

### Vitesse des planètes autour du Soleil

Planète	Vitesse	Distance
Mercury	47.4 km/sec	58 mkm
Vénus	35,0 km/sec	108 mkm
Terre	29,8 km/sec	150 mkm
Mars	26,5 km/sec	228 mkm
Jupiter	13,1 km/sec	778 mkm
Saturne	9,6 km/sec	1 427 mkm
Uranus	6,8 km/sec	2 871 mkm
Neptune	5,4 km/sec	4 498 mkm

Ce tableau illustre le fait que plus une planète se trouve distante du Soleil, moins elle se déplace rapidement autour de lui. (Mkm = millions de kilomètres.)

**Et des galaxies, comme la nôtre, il y en a des milliards et des milliards qui, ensemble, constituent l'Univers que nous observons.**

Les galaxies sont formées, en gros, d'une centaine de milliards d'étoiles (il y a de plus petites, formées de quelques milliards d'étoiles, jusqu'à de gigantesques comptant plusieurs centaines de milliards d'étoiles, sinon même jusqu'à des trillions d'étoiles). La plupart des galaxies que nous observons à l'heure actuelle sont en grande partie faites d'étoiles – de la matière baryonique. Mais elles renferment également un pourcentage de matière diffuse constituée de matériel gazeux (surtout de l'hydrogène et de l'hélium) à partir duquel se forment les étoiles. Et il y aussi – très important même si la masse est infime (de l'ordre de 1% du tout) – de la poussière microscopique formée de glaces et de grains solides d'éléments lourds (graphite, silicate...).

En gros, la matière de l'Univers visible est faite principalement de gaz très chaud (plasma) – ce sont les étoiles qui forment la majeure partie des galaxies – en plus de nuages de gaz à différentes températures dispersés entre les étoiles et de poussières interstellaires qui ont tendance à s'agglutiner.

### **Troupeaux de moutons cosmiques**

**Tout cela forme les galaxies et nous avons l'impression que celles-ci sont distribuées au hasard dans l'Univers. Mais en réalité, elles se tiennent en groupe, n'est-ce pas?**

Ça, c'est une observation qui intrigue les astronomes depuis les années 1930, alors qu'on avait mis en évidence que les galaxies sont, en gros, distribuées un peu au hasard. Au-delà de 1 milliard d'années-lumière, on pourrait dire que tout est à peu près pareil, que les galaxies sont à peu près distribuées uniformément.



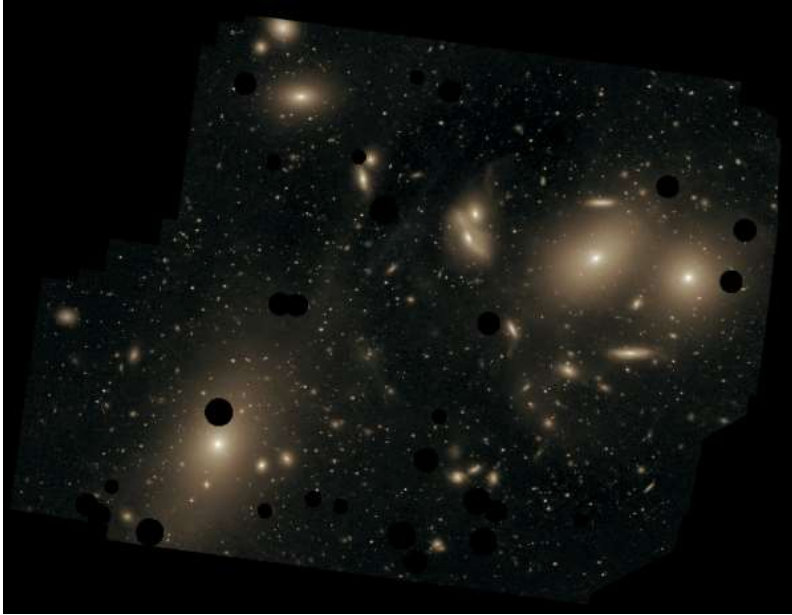
Des milliers de galaxies réparties ça et là à travers l'Univers.

Cependant, à une échelle de 1 milliard d'années-lumière ou moins – ce qui est une fraction assez importante de l'Univers –, les choses sont différentes.

À plus basse échelle, on se rend compte que les galaxies sont un peu comme des moutons, c'est-à-dire qu'elles aiment se regrouper en troupeaux!

Elles forment ainsi des regroupements; par exemple, la Voie lactée et la galaxie d'Andromède (qui se trouve à 2,5 millions d'années-lumière de nous) sont les deux principaux membres du Groupe Local formé par une trentaine de galaxies, la plupart toute petite – avec un milliard ou moins d'étoiles.

Il y a des rassemblements plus importants de galaxies qu'on appelle des *amas de galaxies*.



Amas de galaxies dans la constellation de la Vierge (les étoiles les plus brillantes ont été masquées). L'amas est à environ 65 millions d'années-lumière. (Crédit: European Southern Observatory.)

Le plus proche de nous, c'est l'amas de galaxies situé dans la constellation de la Vierge, qui regroupe plusieurs centaines de galaxies. Or si, dans l'ensemble de l'Univers, les galaxies sont en moyenne distantes d'environ un million d'années-lumière, dans un amas, on peut trouver une centaine de galaxies dans un rayon de 1 million d'années-lumière seulement.

L'un des plus gros amas de galaxies, qui se situe à quelques centaines de millions d'années-lumière de nous, est l'amas de la Chevelure de Bérénice – l'amas dit *Coma*. Il comprend plus d'un millier de galaxies bien identifiées dans un volume d'environ deux millions d'années-lumière. (Voir photo page suivante.)

On s'est rendu compte que ces amas font un peu de la patrouille; les moutons ont en quelque sorte des bergers. Il y a donc ce qui semble être des chaînes qui, à l'échelle de dizaines et

de centaines de millions d'années-lumière, connectent ces regroupements; ce sont les *filaments*. Et tout l'ensemble de ces filaments forme ce qu'on appelle les *grandes structures* de l'Univers.

Tout semble donc former une sorte de patron qui prend les allures d'une toile d'araignée qui aurait été légèrement brassée par le vent.

C'est donc dire qu'à une échelle de 1 milliard d'années-lumière et moins, la

matière qu'on voit sous forme d'étoiles rassemblées au sein de galaxies constitue des patrons dans une organisation en chapelets qui rassemble le tout.

**Ce qui est fantastique, lorsqu'on y songe, c'est que les galaxies sont composées de centaines de milliards d'étoiles... qui, à leur tour, forment des centaines de milliards de galaxies!**

On peut estimer à l'heure actuelle que le nombre de galaxies observables serait de l'ordre de deux à trois cents milliards!

**Un tel nombre signifie que si on tentait d'observer une à une chacune des galaxies en n'y consacrant qu'une seconde, il nous faudrait de 65 à 100 millions d'années pour y parvenir – c'est-à-dire plus de temps qu'il ne s'est écoulé depuis la disparition des dinosaures!**

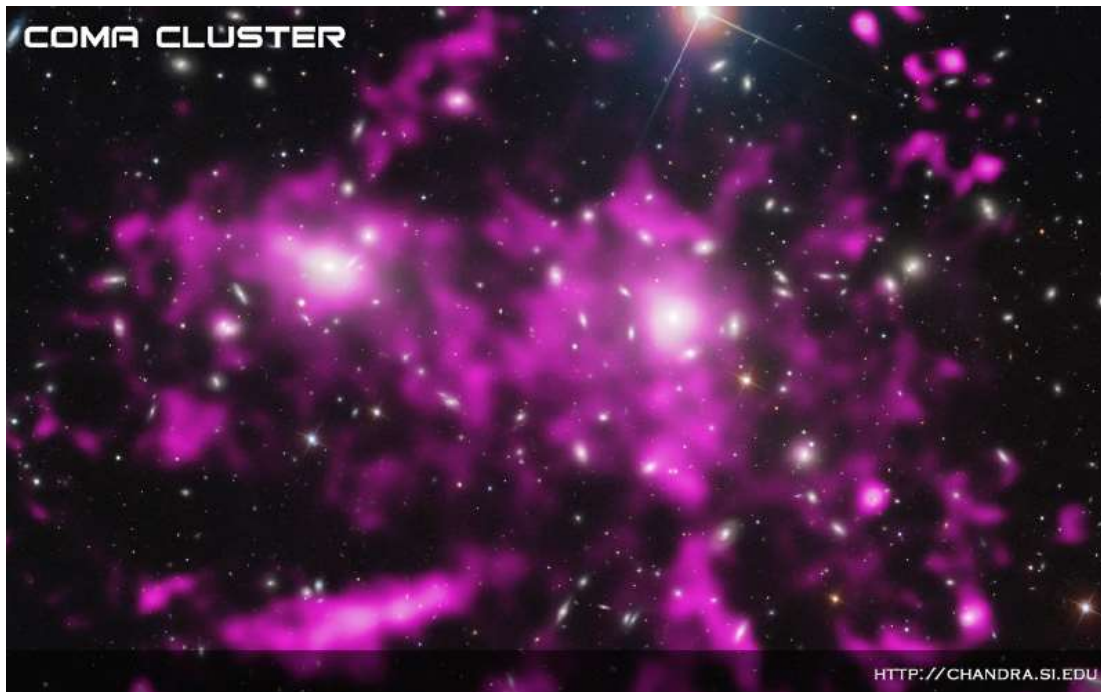


Image composite en rayons X (couleur mauve) et en lumière visible (couleur blanche) de l'amas de galaxies Coma situé à environ 320 millions d'années-lumière. Crédit: X-ray: NASA/CXC/MPE/J. Sanders et al, Optical: SDSS.)

## Un Univers en expansion

Mentionnons un point important sur lequel nous reviendrons sous peu. Il y a donc des amas de galaxies qui sont retenus ensemble par une force. Il s'agit bien entendu de la gravitation. C'est d'ailleurs cette force qui maintient les planètes en orbite autour du Soleil et le Soleil au sein de notre galaxie. Mais, entre les amas de galaxies, il y a quelque chose qui se passe: ils s'éloignent les uns des autres. C'est ce qu'on appelle l'*expansion de l'Univers*. Cette expansion a été mise au jour en 1927 par le cosmologiste belge George Lemaître.

C'est un phénomène fondamental en cosmologie. On pourrait dire que les amas de galaxies sont en quelque sorte à l'abri de l'expansion de l'Uni-

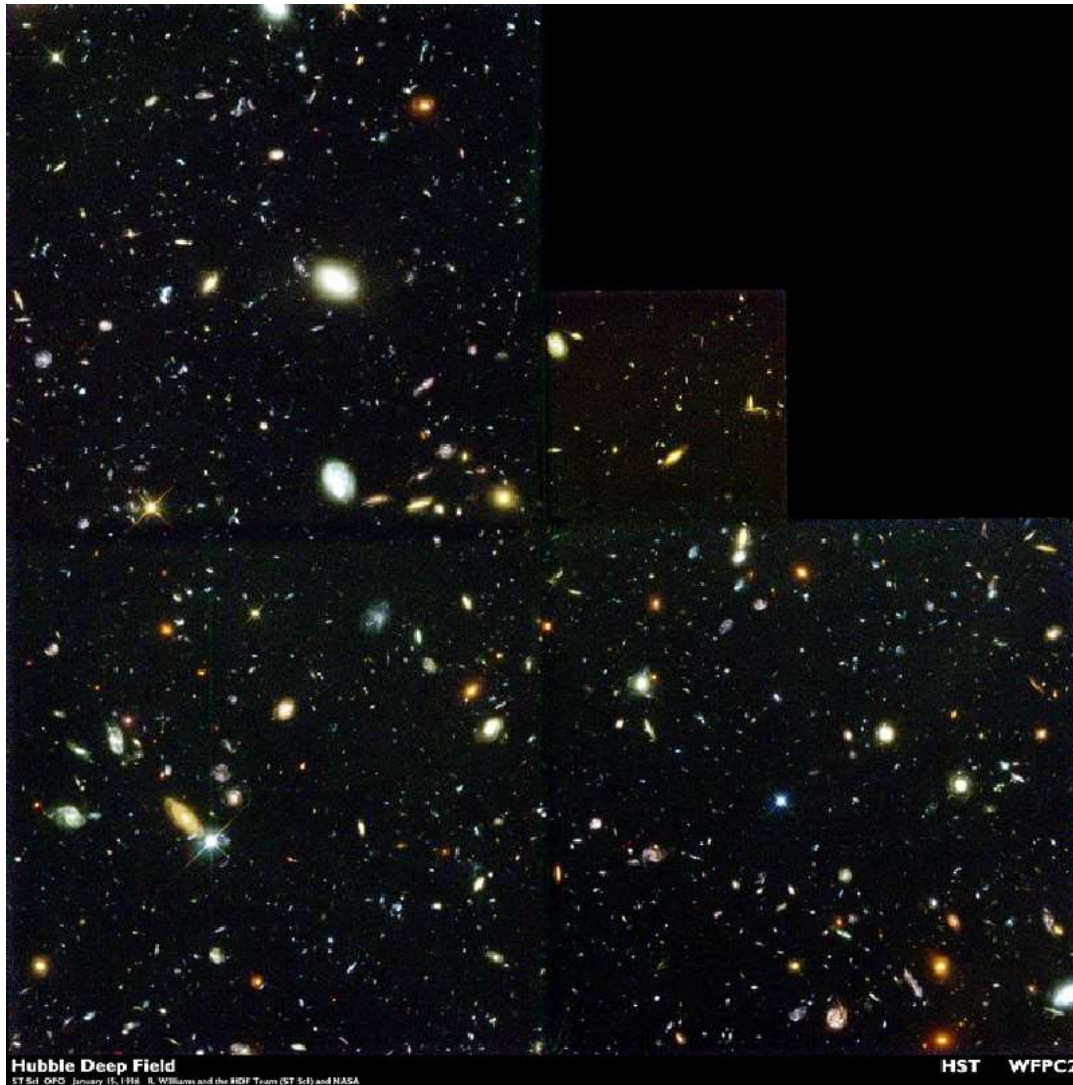
vers puisque toutes les galaxies y demeurent rassemblées, comme dans un troupeau de moutons, bien liées par la gravitation. Cependant, chacun des amas de galaxies (ainsi que les autres galaxies éparses non membres d'amas) s'éloignent les uns des autres. L'espace qui contient les galaxies et les amas de galaxies est en expansion.

**Et tout ce dont on vient de parler, tout l'Univers visible que nous venons de survoler, ne représenterait que... 5% de tout l'Univers?**

Oui, mais plus ou moins...

En fait, je dirais qu'il ne nous faut pas partir «en peur» avec cela, parce que ce 5%, on le connaît bien... mais on connaît beaucoup moins bien la matière sombre et encore nettement moins l'énergie noire, comme nous le verrons.

## L'Univers dans une tête d'épingle



En 1995, le télescope spatial Hubble a pris une photo sensationnelle. Durant dix jours, le télescope a concentré sa puissance d'observation pour scruter une infime parcelle du firmament – pas plus grosse qu'une tête d'épingle – et, ô surprise, il y a découvert une foule de galaxies de toutes formes, de toutes tailles et à des stades d'évolution différents. Sur cette photo, qu'il vaut la peine de scruter, on repère plus de 1500 galaxies! (En savoir plus.)

## Deuxième partie: la masse manquante

Maintenant que nous avons abordé le 5% de l'Univers que nous pouvons observer, nous allons parler de la portion de l'Univers qui serait formée par ce qu'on appelle la *matière noire*, ou encore la *matière sombre*. D'où vient l'idée que l'Univers ne serait pas fait que de matière visible qu'on perçoit aisément, mais bien qu'il y aurait aussi quelque chose d'autre?

Si je ne m'abuse, nous avons repéré dans les années 1930 quelque chose qui «clochait» et qui a fait qu'on estime qu'il y a quelque chose d'autre qui existerait en plus de la matière qui compose les milliards d'étoiles et de galaxies qu'on observe?

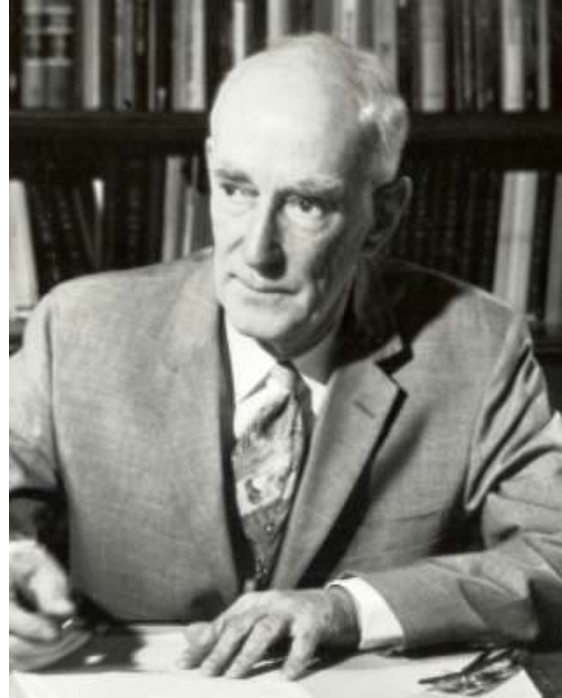
Eh oui. Et je dirais même que c'est l'intrus dans la maison que nous n'aimons pas!

En effet, il a fallu du temps pour qu'on accepte l'idée qu'il existerait quelque chose d'autre que la matière baryonique que nous connaissons.

Suite aux premières allusions à la présence de davantage de masse que ce qu'on obtient lorsqu'on fait la comptabilité de tout ce que nous avons décrit plus tôt – les étoiles, les planètes, les trous noirs, etc. –, on s'est rendu compte qu'il y fallait autre chose pour expliquer la vitesse de déplacement des étoiles et des galaxies.

Tout a commencé il y a près de cent ans, par la mesure des vitesses de déplacement des étoiles au sein de notre propre galaxie, la Voie lactée. En mesurant la vitesse de déplacement de différentes étoiles, un astronome néerlandais, Jan Oort, a cherché à déterminer la masse de notre Voie lactée.

Expliquons-nous.



Jan Oort (1900-1992) est un astronome néerlandais qui a attentivement étudié la Voie lactée afin de comprendre la structure cosmique dans laquelle nous nous trouvons. Et en étudiant attentivement le déplacement des étoiles, il a été le premier à repérer l'existence d'une masse manquante.

### Des étoiles qui se déplacent plus vite que prévu

On peut mesurer la masse du Soleil en connaissant la vitesse de la Terre qui gravite autour et la distance à laquelle notre planète se trouve, simplement en appliquant les équations de Newton.

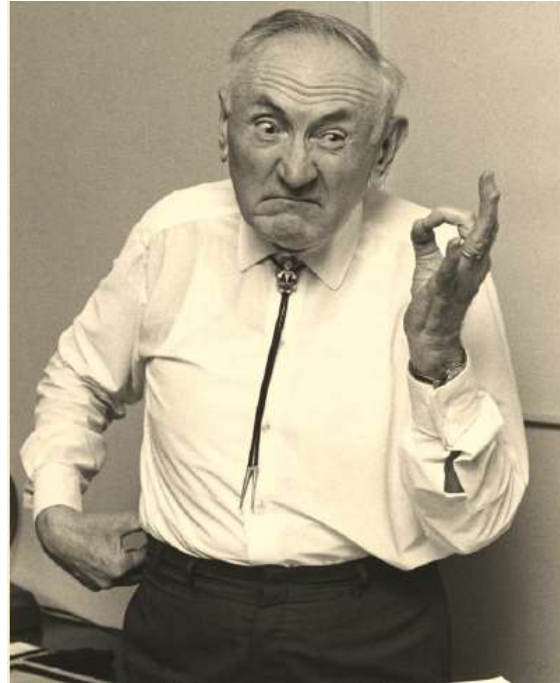
C'est-à-dire que le fait que la Terre se déplace à une certaine vitesse – à 30 km/sec – implique que notre étoile possède une certaine masse. Mais si le Soleil avait été plus massif, la Terre aurait dû se déplacer plus rapidement autour de lui, afin de demeurer sur son orbite actuelle. Et si le Soleil avait été moins massif, la Terre se déplacerait plus lentement pour demeurer à la même distance. Ainsi donc, le fait de connaître la vitesse de déplacement de la Terre autour du Soleil (30 km/sec) nous permet de déterminer la masse de notre étoile.

Or, la même chose s'applique aux étoiles qui se déplacent autour du centre de notre galaxie; leur vitesse de déplacement dépend de leur distance par rapport au centre et de la masse de celui-ci.

Ian Oort a donc entrepris de déterminer la vitesse de déplacement d'un certain nombre d'étoiles. En outre, il a cherché à déterminer la vitesse de déplacement de certaines étoiles qui ne se trouvent pas dans le plan de la galaxie, là où se trouve l'immense majorité des étoiles. Il y a en effet certaines étoiles qui se trouvent soit un peu au-dessus ou soit un peu en-dessous du plan où se trouvent l'ensemble des étoiles qui forment le disque (la «pizza») de la Voie lactée.

Or, dans les deux cas, Oort a observé que la vitesse de déplacement des étoiles était plus élevée que ce à quoi on s'attendait lorsqu'on fait la somme de la masse de toute la matière qu'on observe dans notre galaxie. (Un peu comme si la Terre tournait plus rapidement autour du Soleil que ce qu'elle devrait faire compte-tenu de la masse du Soleil qu'on observe.)

Oort suggère alors le terme de «masse manquante». Pour ma part, je préfère le terme de «masse cachée», puisqu'il y a quelque chose qui n'a rien à voir avec la matière baryonique qu'on connaît.



Fritz Zwicky (1898-1974) est un astrophysicien américano-suisse connu pour avoir entre autre mis de l'avant l'idée «choquante» d'une importante masse sombre dans l'Univers.

### **De la masse manquante... en quantité?**

Mais celui qui nous a imposé cette idée, c'est Fred Zwicky, un astronome suisse travaillant aux États-Unis dans les années 1960.

Zwicky s'intéressait aux amas galactiques, ces grands rassemblements de galaxies – ces troupeaux de moutons. Il cherchait à calculer la masse totale de différents amas de galaxies. Il a d'abord fait la somme de la masse de chacune des galaxies, puis il a appliqué les lois de Newton pour calculer la vitesse de déplacement de chacune des

galaxies au sein même de leur amas. (Comme des moutons qui se déplacent à l'intérieur de leur troupeau.) Or, il a trouvé que la masse totale des différents amas de galaxies était des *dizaines de fois* plus élevée que la somme des masses des galaxies qu'on observe au sein de chacun de ces amas.

Zwicky est donc le premier à introduire le terme de «matière sombre» (*dunkle materie* en allemand). Il a ainsi publié un article visionnaire en 1937, un classique qu'on fait désormais lire à tous nos étudiants aux études supérieures en astronomie. C'est donc lui qui met cette idée sur la table.

**Zwicky calcule la masse qu'on observe dans un troupeau de galaxies, et il se rend compte que celles-ci se déplacent plus rapidement que ce qu'implique la masse qu'on observe. Il y aurait donc une masse supérieure à celle qu'on observe – comme si on observait que la vitesse de déplacement des planètes autour du Soleil impliquait que celui-ci avait une masse nettement supérieure à celle qu'on déduit de sa luminosité et autres propriétés physiques.**

Exact. Il y a une masse manquante qui dépasse la somme de toutes celles qu'on observe; il y a donc quelque chose d'autre. Et surtout, il en manque énormément!

Ce qu'a observé Zwicky était indiscutable; il y a quelque chose qui exerce un effet gravitationnel qui ne peut être expliqué seulement par la matière baryonique. Voilà pourquoi je préfère parler de masse *cachée*, puisque si on emploie l'expression *matière sombre*, on est en train de supposer l'existence de quelque chose de précis; d'une *matière* quelconque,

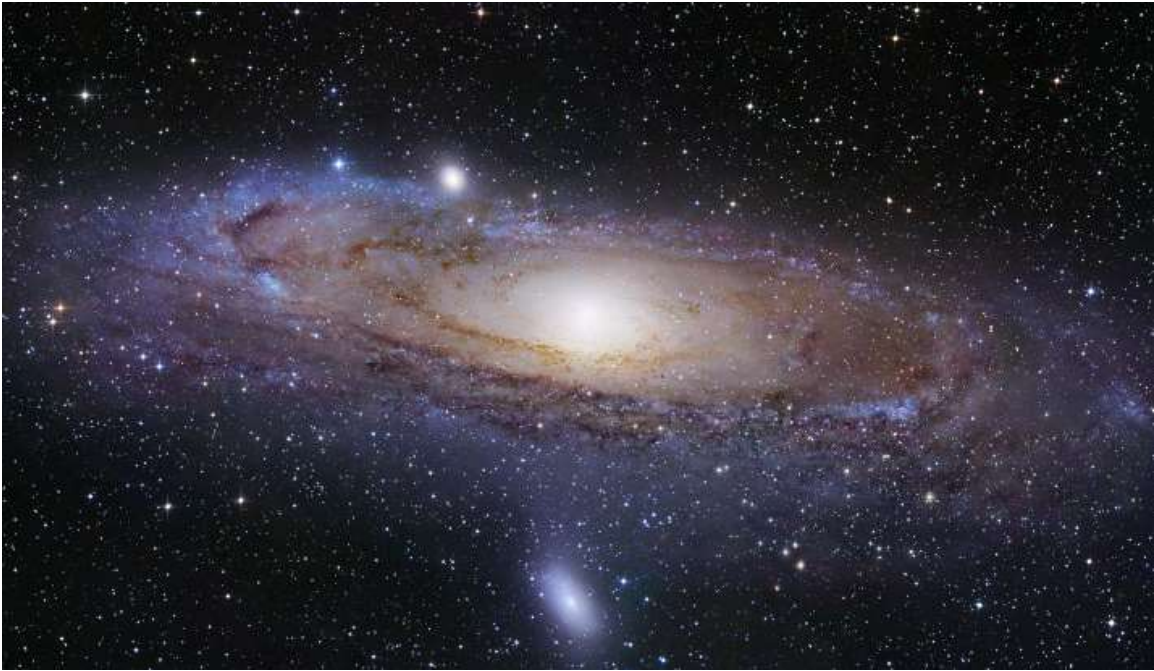
alors que dans les faits, nous n'en savons rien!



Horace Babcock (1912-2003) est un astronome américain qui met en évidence une importante masse sombre au sein de la galaxie d'Andromède.

### **Une sphère de matière sombre autour des «pizzas»**

Maintenant, cette histoire de matière sombre a été un peu oubliée jusqu'à ce qu'un jeune astronome américain, Horace Babcock, fit sa thèse à ce sujet, en examinant cette fois la grande galaxie d'Andromède. Babcock a observé la vitesse de déplacement des nébuleuses autour du centre de cette galaxie et il s'est rendu compte qu'au lieu de décroître au fur et à mesure que les étoiles se trouvent en périphérie de la galaxie – comme on devrait s'y attendre – ces vitesses augmentaient sans cesse.



La splendide galaxie d'Andromède, notre voisine, deux fois plus imposante que la Voie lactée.

En principe, plus un objet céleste est proche du centre autour duquel il gravite, plus élevée est sa vitesse. Ainsi, Mercure se déplace autour du Soleil à une vitesse supérieure à celle de la Terre, tandis que Jupiter se déplace à moins grande vitesse que ne le fait la Terre. (Voir le tableau en page 9.) Or, on observe le comportement inverse au sein de la galaxie d'Andromède.

Ce phénomène peut justement s'expliquer par la présence d'une masse cachée, quelque chose distribuée à grande échelle. C'est donc dire qu'on n'observe pas cet effet à petite échelle, comme par exemple au sein du Système solaire. On n'observe aucun signe qu'il y aurait un effet de la matière sombre à notre échelle, ce qui s'expliquerait par le fait qu'on serait noyé dans la masse cachée. On n'y serait pas sensible puisqu'il y en aurait autant à l'extérieur qu'à l'intérieur du

Système solaire. Pour la ressentir, il faut être à des échelles de dizaines de milliers d'années-lumière — ce qui n'est pas énorme lorsqu'on considère que notre galaxie mesure 100 000 années-lumière.



Vera Rubin (1928-2016) est une astronome américaine qui, en collaboration avec Ken Ford, a mis en évidence l'existence de matière sombre en périphérie des galaxies.

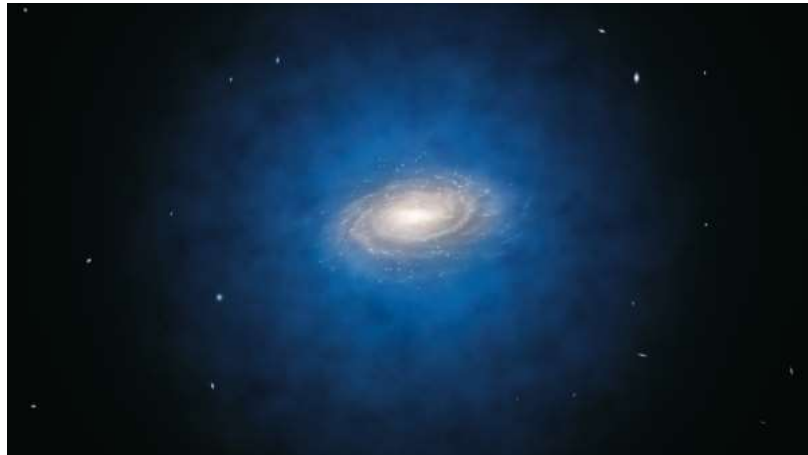
Puis, dans les années 1970, Vera Rubin et Ken Ford font progresser ce concept que, pourtant, personne n'aime

puisqu'on parle de quelque chose au sujet duquel on ignore tout. Or, tout physicien n'aime pas prendre en compte quelque chose dont on ignore la nature, de quelque chose dont on ne perçoit que l'effet.

C'est un peu comme si on parlait d'un fantôme! C'est comme si quelqu'un affirmerait avoir vu un fantôme dans l'Univers! On n'aime pas ça, mais pas du tout! Pourtant, l'effet dynamique qu'exerce cette «masse manquante» n'est pas fantomatique, il est bel et bien observé. Ainsi, depuis les années 1980 et 1990, on observe que les amas de galaxies contiennent des quantités colossales de gaz extrêmement chauds, des plasmas ténus portés à des températures de plusieurs millions de degrés qui ne peuvent être retenus que par la présence d'une importante masse cachée.

Par contre, du point de vue théorique, les physiciens et les astrophysiciens théoriciens aiment beaucoup la matière sombre. Pour eux, celle-ci forme une sorte de bulle autour de chacune des galaxies. Cette matière sombre prendrait la forme d'une sphère ou d'un halo enveloppant toute galaxie. Ainsi ce halo de matière sombre contribuerait à stabiliser ce système plat, à faire en sorte d'éviter que des portions de la galaxie ne volent en éclats.

Donc, si les astronomes observateurs et de terrain n'aiment pas trop la matière sombre – à cause de sa nature



Vue d'artiste de la distribution de matière noire (en bleu) telle que nous l'imaginons autour de la Voie Lactée. (Crédit: ESO.)

fantomatique – les théoriciens l'acceptent sans problème puisqu'elle permet d'expliquer pas mal de choses.

### Mais des doutes subsistent...

Néanmoins, certains spécialistes ont proposé de mettre de côté cette matière «fantôme». Pourquoi faire appel à de la masse manquante, de nature complètement inconnue, disent-ils en substance, alors qu'on pourrait traiter la question d'une façon simple, c'est-à-dire en altérant tout bonnement la loi de la gravitation universelle? Certains proposent donc une loi de la gravitation *modifiée*.

Selon la loi universelle de la gravitation énoncée par Newton, la force d'attraction entre deux corps est inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. On pourrait cependant mettre un autre terme qui modifierait l'action de la force gravitationnelle à grande distance.

Il s'agit en quelque sorte d'une approche «iconoclaste» puisque ça met en cause Newton et Einstein. Or, à l'heure actuelle, il est difficile de

mettre en cause ces théories étant donné qu'elles ont été maintes fois vérifiées de toutes les façons imaginables.

Disons donc que la majorité des astronomes et physiciens accepte que le concept de matière sombre soit utile et qu'il vaut la peine de l'explorer, en essayant entre autres d'identifier ce qui constituerait cette matière sombre... si elle existe! Mais les nouvelles théories de la gravitation modifiée vont à l'encontre de certaines observations astronomiques.

Néanmoins, cette approche a ses supporteurs... dont on pourrait dire que ce sont les «moutons noirs» de l'astrophysique moderne! Mais en science, il est toujours très utile, voire essentiel, d'avoir des gens qui soulèvent les anomalies et remettent en question certaines choses...

### **De quoi serait faite la masse manquante?**

**Et si on parlait brièvement de quoi pourrait être constituée cette masse manquante. On imagine parfois des trous noirs (qui seraient impossibles à détecter), ou peut-être de l'anti-matière ou encore des nuages de poussière qui existeraient en très grande quantité, ou de quoi d'autres encore?**

Hélas non, puisqu'on a éliminé à peu près toutes ces possibilités. En fait, l'idée qu'il pourrait s'agir de la matière baryonique sous une forme qui n'est pas assez massive pour être comptabilisée ne pourrait suffire à cause des quantités de matière extrêmement élevées dont a besoin. En outre, on verrait différents effets de

cette «matière manquante» qui trahiraient sa présence.

**De fait, la fameuse masse manquante équivaut à *six fois* la masse de toute la matière visible que nous connaissons. On aurait donc besoin de repérer six fois plus de matière que ce qu'on observe!**

En effet, pour rendre compte des effets gravitationnels qu'on observe, la masse manquante correspond à une valeur variant entre six et dix fois plus grande que la matière baryonique que nous observons. Il nous en faut donc *énormément*.

**Mais de quoi pourrait donc être constituée cette fameuse masse manquante?**

Parlons d'abord des propriétés de cette masse manquante. On a dit plus tôt qu'on l'observe à grande échelle uniquement – c'est-à-dire même pas à l'échelle du Système solaire.

De plus, on estime que cette masse manquante serait sans collision, ce qui signifie que ce qui la constituerait – et notez bien qu'on parle au conditionnel – ne peut pas se condenser pour former des «grumeaux». Cette masse manquante ne peut donc pas former des amas de matière, comme jadis la matière interstellaire s'est condensée pour former les étoiles et les planètes. On ne voit donc pas des «boules» de matière sombre dans laquelle on évoluerait sans percevoir aucun effet.

On ne peut pas non plus la comprimer ni la dilater aisément (du moins, on n'imagine pas comment).

Cette masse manquante est aussi totalement invisible, c'est-à-dire qu'au-

cune onde électromagnétique – lumière visible, rayons X, rayons gamma, ondes radio, ondes infrarouges... – ne nous permet de la détecter, et ce d'aucune façon. Cette «matière sombre» ne bloque aucune lumière, aucune onde électromagnétique. Elle est donc totalement transparente.

On pourrait donc parler de matière transparente... si matière il y a! Mais gardons toujours à l'esprit qu'on n'est pas dans le certain, comme on l'est avec la matière baryonique.

### S'agirait-il de... WIMPS?

En conséquence, on fait l'hypothèse qu'il s'agirait d'une matière faite de particules étranges dont les physiciens des particules tentent d'imaginer la nature. Il doit s'agir de particules qui ne sont sensibles à aucune interaction avec la lumière et on ne peut pas entrer en collision avec elle. Il s'agirait de particules parfaitement perméables – pouvant passer à travers n'importe quelle sorte de matière – et qui est

parfaitement transparente. Tout ça pour dire qu'il nous faut donc faire appel à des catégories de particules que nous ne connaissons pas. Ce serait complètement autre chose que tout ce que nous connaissons... mais qu'on espère parvenir à détecter d'une manière ou d'une autre.

On regroupe ces particules exotiques sous le vocable anglais WIMPS, pour *Weakly interacting massive particles*, donc des particules massives (dont la masse serait des milliers de fois supérieure à celle du proton) mais qui aurait extrêmement peu d'interaction avec la matière. On espère toutefois qu'elles laisseraient parfois, mais très rarement, d'infimes traces.

Et c'est ainsi qu'on cherche depuis une vingtaine d'années à détecter d'hypothétiques particules qui constitueraient la matière sombre, la matière noire, ou masse cachée ou matière invisible – toutes des appellations qui vous indiquent la nature flottante de la bête qu'on recherche!

## Troisième partie: l'énergie noire

Parlons maintenant de l'essentiel de ce qui constituerait l'Univers puisque, comme nous l'avons vu, la matière baryonique et la masse manquante ne formeraient tout au plus que 30% de l'Univers. Le 70% restant (et peut-être même davantage) serait constitué de ce qu'on appelle l'*énergie noire*. Il y aurait donc quelque chose d'encore plus difficile à saisir que la masse manquante. On aurait ainsi découvert, il y a environ vingt-cinq ans, qu'au-delà de la masse manquante, on observerait une sorte d'énergie noire ou transparente.

On a tantôt parlé de masse et là, nous allons parler d'énergie. Il faut d'abord se rappeler qu'il s'agit en fait des deux facettes d'une même réalité physique, selon la célèbre formule d'Albert Einstein  $E=mc^2$ , où l'énergie E

peut être convertie en masse m, et vice versa.

L'Univers serait donc constitué de 5% de masse visible, d'environ 22% de masse manquante et de plus de 70% d'énergie noire. Et là, comme vous

pouvez l'imaginer, nous parlons d'un «super fantôme»... qui nous oblige à faire un grand saut dans l'inconnu.

La matière baryonique et la masse manquante ont au moins une propriété en commun: elles sont sujettes à la force gravitationnelle: on dit qu'elles sont *gravifiques*. Ces matières génèrent un champ gravitationnel qui attire tout ce qui est à leur portée.

Par contre, l'énergie noire produit un effet *répulsif*, donc totalement différent. Au lieu de faire que les choses s'attirent les unes vers les autres, s'agglutinent et demeurent ensemble, l'énergie noire fait en sorte que toute chose repousse l'autre.

Nous avons eu un avant-goût de cela dans les équations de la gravitation et de la géométrie de l'espace proposées par Albert Einstein il y a un siècle: la relativité générale. Dans ces équations, Einstein avait justement introduit une composante de répulsion afin d'éviter que l'Univers ne soit en expansion ou qu'il ne s'effondre sur lui-même par l'effet de sa propre masse. Il avait ainsi introduit une constante *lambda* dont le rôle était de faire en sorte que l'Univers demeure statique, ni qu'il ne s'étende ni qu'il ne se contracte. Je le rappelle, Einstein voulait un univers statique.

**Il y avait donc la force attractive de la gravitation, qui tend à compresser l'Univers, et Einstein a introduit une force stabilisatrice pour faire en sorte que l'Univers soit stable. Ses équations le permettaient.**

Mais en 1927, le jeune cosmologiste belge George Lemaître a montré que le terme *lambda* avait sa place puisque,

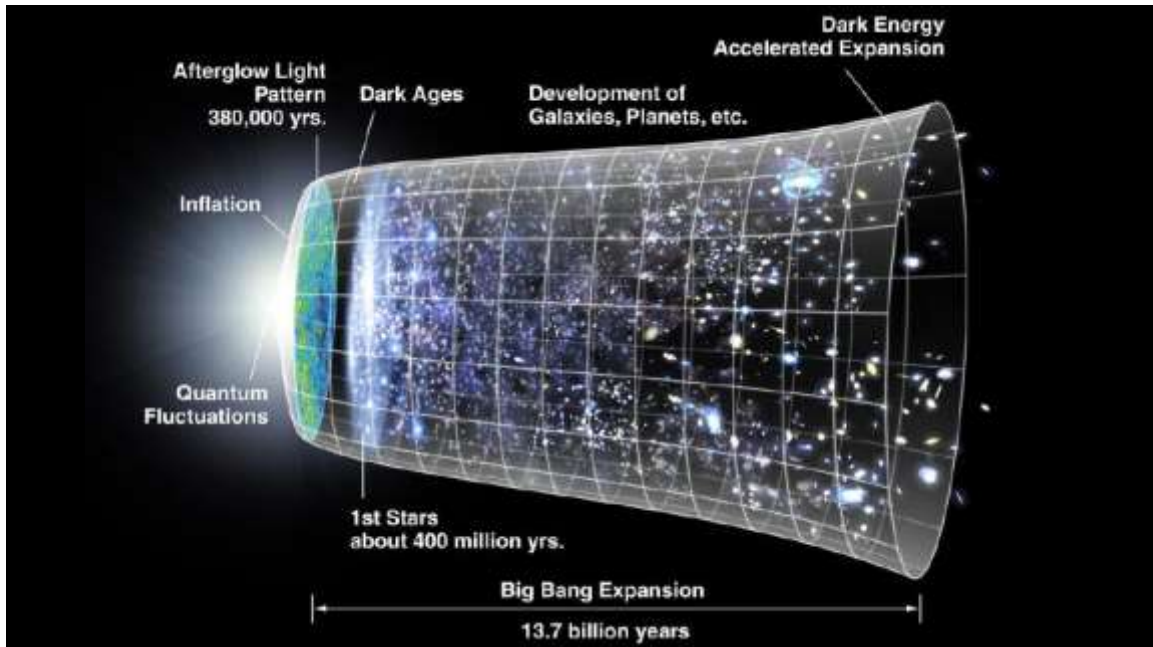
dans les faits, l'Univers était en expansion. Ce que confirmèrent d'ailleurs les observations astronomiques d'Edwin Hubble en 1929. L'Univers n'est donc pas statique, comme en était convaincu Einstein, mais en expansion. Einstein fut néanmoins heureux, car il pouvait se débarrasser de ce *lambda* qu'il n'aimait pas. Mais Lemaître persista en insistant sur la consistance mathématique d'avoir *lambda* dans les équations de la relativité générale et sa signification physique.

C'est donc dire que, mathématiquement, l'énergie noire concorderait avec les équations d'Einstein de la relativité générale. Mais, malgré l'intuition de Lemaître, on n'avait pas encore trouvé un grand rôle pour ce *lambda* de la relativité générale.

### **Une vitesse d'expansion croissante?**

Tout était au beau fixe jusqu'en 1998, alors qu'un groupe d'astronomes travaillant en deux équipes distinctes – et que je connais très bien – a mesuré le taux d'expansion de l'Univers en fonction du temps. Ce qui motivait initialement ces chercheurs, c'était de voir comment la masse présente dans l'Univers pouvait ralentir l'expansion, un peu à la manière d'une balle qu'on lance en l'air. Cette balle monte tout en ralentissant progressivement puisque soumise à la gravité, pour s'arrêter et finalement retomber.

Cependant, au lieu de détecter une décélération de la vitesse d'expansion de l'Univers en fonction du temps et de la distance, ces chercheurs ont observé une accélération du taux d'expansion de l'Univers. Une accélération! Bien sûr, cela était totalement inattendu.



Ce graphique résume notre conception de l'expansion de l'Univers, qui s'est amorcée il y a 13,7 milliards d'années et qui se poursuit aujourd'hui encore.

On s'attendait à ce que la vitesse d'expansion de l'Univers ralentisse, mais sans jamais s'arrêter. Mais là, on a découvert, grâce à des observations menées avec plusieurs grands télescopes au sol et le télescope Hubble dans l'espace, c'est qu'au contraire, cette vitesse tend à s'accroître?

C'est cela. D'ailleurs, lorsque j'étais au télescope Gemini Nord (à Hawaï), nous avons participé à des travaux pour confirmer le résultat préliminaire. J'y ai contribué en prenant des spectres de supernovæ lointaines.

Il y a donc quelque chose qui fait que l'espace à travers tout l'Univers se détend plus rapidement que ce à quoi on s'attendait. Et cette «force de répulsion» est encore plus importante que la force exercée par la masse manquante.

En conséquence, certains ont évoqué un autre «fantôme» qu'on appelle l'énergie noire. Mais cette fois-ci, on

n'a *aucune idée* de ce dont il s'agit! On a fait appel au concept quantique de l'«énergie du vide», mais on se bute alors à de sérieux problèmes d'inconsistance.

Et pour être juste, soulignons qu'il existe quelques travaux observationnels qui remettent en question la fiabilité des mesures du taux d'accélération de l'expansion de l'Univers. Voilà qui est excellent puisque cela oblige tout le monde à renforcer ses données et à prendre en compte tous les effets qui peuvent affecter la prise de ces mesures, et en particulier la détermination précise de la distance. Car, il faut savoir qu'en astronomie, mesurer une vitesse est très facile, mais mesurer une distance précise, ça demeure toujours un défi.

### Que conclure de tout ça?

Revenons donc aux trois constituantes de l'Univers.

Il y a d'abord la matière baryonique, qui paraît être la plus petite portion de l'Univers, mais celle qu'on connaît le mieux et qu'on comprend bien.

Puis, il y a le premier fantôme dont on a parlé: la masse cachée — la matière sombre ou matière noire — dont nous constatons les effets gravitationnels et dont on connaît certaines propriétés. Par contre, il existe des théories alternatives qui pourraient nous permettre de se passer de cette «matière sombre». Mais ces théories ont leurs problèmes.

Enfin, il y a la fameuse énergie noire, qui a cet aspect répulsif, probablement autre que le  $\lambda$  qu'on trouve dans les équations d'Einstein modifiées et interprétées par Lemaitre, Friedman et bien d'autres. Cette théorie introduit un «facteur de répulsion» dont on n'a aucune idée de la nature.

Il s'agit d'une notion complexe, une sorte de pression négative. Imaginez une sorte de ressort qui serait comprimé et que vous laisseriez aller. Ce ressort va donc exercer une répulsion. Mais dans le cas de l'énergie noire, on a besoin d'un ressort dont on n'a aucune idée et qui fait quelque chose qu'aucun ressort normal ne fait.

Et encore plus bizarre, il semble que cet effet de répulsion aurait été plus important ces cinq dernières milliards d'années que dans l'histoire préalable de l'Univers (qui remonte à 13,8 milliards d'années). Comment imaginer qu'il pourrait s'agir uniquement d'un effet récent? Voilà qui paraît très bizarre...

Pour ma part, je pense que l'accélération de l'expansion de l'Univers est bel et bien réelle — ça, c'est à peu près

sûr — mais son interprétation en termes d'énergie noire est une tentative pour chercher à expliquer ce qu'on observe. Mais cette explication cache en fait notre ignorance.

La dynamique des galaxies et des amas de galaxies semble être affectée par une masse cachée —, cet aspect dynamique, on le mesure puisque les vitesses des grands systèmes cosmiques sont si grandes qu'on a besoin de quelque chose pour l'expliquer. Mais ce quelque chose — la matière sombre — on ignore de ce dont il s'agit.

De même pour l'accélération de l'expansion de l'Univers qui est probablement réelle. Mais on est toujours à la recherche d'une explication satisfaisante.

Tout compte fait, on opère aux limites de nos connaissances astronomiques et physiques et c'est ce qui fait le plaisir et la fascination de la science: mener à bien cette exploration.

En terminant, j'aimerais citer une astronome que j'ai connue et qui nous a quittée en 2016. L'américaine Vera Rubin, que nous avons mentionnée plus haut, a joué un rôle déterminant dans la mise en évidence de la matière sombre et de sa distribution dans les galaxies individuelles.

Dans une entrevue enregistrée en 1989, elle a sagement rappelé ce qui suit: «Je ne vois en fait aucune raison pour laquelle nous — et j'inclus tout le monde de notre génération — nous aurions été à ce point chanceux de vivre à un moment où l'Univers serait compris dans toute sa totalité.»

Pour sûr qu'il nous reste énormément de choses à découvrir, et c'est en soi *formidable!* ■

# Les Fascicules de Voyage dans l'espace

