

Structure de l'univers

Les Galaxies

Nous savons depuis Hubble que les étoiles ne sont pas présentes partout dans l'Univers mais qu'elles sont regroupées par centaines de milliards dans de grands ensembles appelés galaxies. Le Soleil est une étoile parmi 200 milliards formant notre galaxie, *la Voie Lactée*. Une galaxie contient également une grande quantité de nuages de poussière et des nébuleuses, véritables pouponnières d'étoiles. Toutes les étoiles d'une même galaxie tournent autour du noyau de celle-ci.

Il existe énormément de galaxies dans l'Univers, certainement des milliards. On les regroupe (depuis Edwin Hubble) en 4 grandes catégories:

- *les galaxies spirales :*

Elles sont les plus répandues dans l'univers. Environ 75 % des galaxies sont spirales. Ces galaxies sont caractérisées par un bulbe central très dense et très lumineux, et un disque dessinant une structure spirale; autour de cet ensemble, un halo sphérique contient quelques vieilles étoiles regroupées en amas globulaires.

La Voie Lactée est elle-même une galaxie spirale. Elle contient environ 200 milliards d'étoiles sur un diamètre de 100 000 années-lumière. Le Soleil se situerait en bordure, à 30 000 a.l. du centre galactique.



- *les galaxies elliptiques :*

Elles ont une forme d'ellipse voire de sphère. Contrairement aux spirales, ces galaxies contiennent très peu de gaz ; la formation stellaire est très faible et les étoiles les constituant sont vieilles en général.

- *les galaxies lenticulaires :*

Ce sont des galaxies alliant des caractéristiques des deux types précédents. S'agit-il d'une évolution d'une galaxie spirale ou elliptique ? La question se pose toujours.

- *Les galaxies irrégulières :*

Généralement peu massives, elles n'ont pas de forme caractéristique. Les deux nuages de Magellan, visibles à l'œil nu dans l'hémisphère sud, font partie de cette catégorie.

D'après les dernières études, les galaxies cacheraient en leur centre un trou noir hypermassif de plusieurs millions voire milliards de masses solaires ; rien à voir avec les petits trous noirs créés à la mort de certaines étoiles. La présence de ce trou noir pourrait expliquer la cohésion d'un ensemble aussi gigantesque qu'une galaxie.

Collisions de galaxies

Toute galaxie a un mouvement propre. Hubble, astronome américain, a démontré en 1929, que les galaxies en général nous fuyaient. Mais des galaxies proches peuvent s'attirer par gravité et rentrer en collision. Ce phénomène semble assez fréquent dans l'Univers. La collision déforme les galaxies suivant des processus complexes dépendant de leur structure, le stade final étant la constitution d'une seule galaxie beaucoup plus grosse. Contrairement à ce qu'on pourrait penser, il n'y a aucun risque de collision d'étoiles. En revanche, certaines étoiles se retrouvent éjectées de leur galaxie d'origine par des effets de marée.

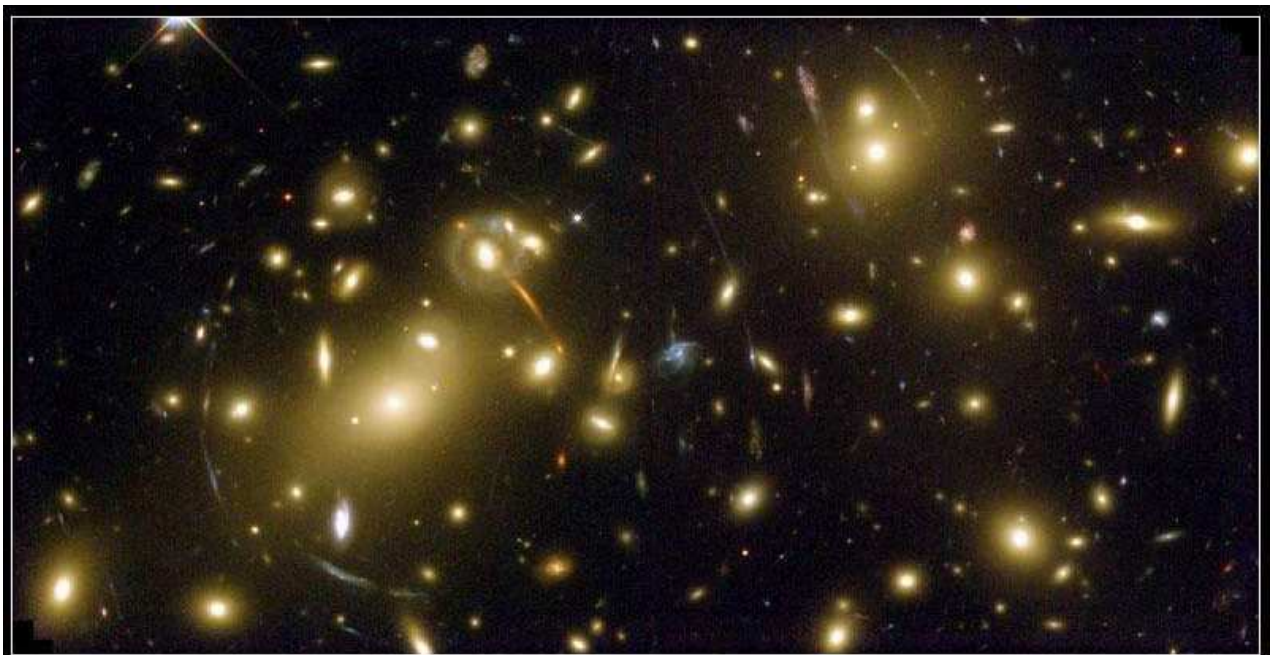
Les collisions de galaxies entraînent un autre phénomène : les gaz et les poussières présents dans les galaxies d'origine donnent naissance à énormément d'étoiles : Ce sont les *flambées stellaires*. Il semble que La Voie Lactée soit actuellement en train "d'avalier" une galaxie naine ; le phénomène se produisant sur des millions d'années, notre ciel ne changera pas à l'échelle humaine.



Amas de galaxies

Les galaxies se regroupent en amas. La Voie Lactée fait partie, avec une trentaine de ses congénères, de *l'amas local* (les trois plus grandes étant la Voie Lactée, la galaxie d'Andromède et la galaxie du Triangle). Celui-ci semble appartenir à un superamas regroupant plusieurs amas centrés sur l'amas de la Vierge (visible au printemps).

L'étude de la position des galaxies et des amas de galaxies semble faire apparaître une structure en forme d'éponge : les galaxies se regrouperaient suivant des sortes de filaments entourant des grandes zones de vide.



A la recherche de la matière noire

Mystérieuse. Invisible. On peut trouver beaucoup d'adjectifs pour la caractériser mais aucun pour la décrire. Pourquoi ? Eh bien on ne connaît pas grand-chose sur cette matière noire, mais elle a une importance capitale pour la compréhension de notre univers et de son histoire. Toute la matière visible actuellement, que les physiciens nomment matière baryonique, représente seulement 5% environ de la matière qui compose notre univers.

Alors aujourd'hui, même si certains astrophysiciens remettent en cause l'existence de la matière noire, il faut admettre que 95 % de notre univers serait invisible et composé de matière inconnue !

La première étape pour la "découverte" de la matière noire s'est déroulée en 1930. Les astronomes ont trouvé des indices qui indiquaient que la plus grande partie de la matière présente dans l'univers n'émettait pas de lumière.

Cette matière invisible, appelée matière noire ou matière sombre est le ciment qui empêche les galaxies en rotation de se disloquer et qui permet aux galaxies qui se déplacent à très grande vitesse de rester groupées dans un amas. La matière noire semble aussi avoir joué un rôle crucial dans le développement de l'univers : des superamas de galaxies, immensément longs séparés, par des vides énormes. Elle est donc invisible mais puissante et cruciale pour l'univers.

La deuxième étape se déroula en 1933. L'astronome Fritz Zwicky de l'institut californien de technologies étudia les mouvements de galaxies d'un grand amas de la constellation de la Chevelure de Bérénice et découvrit que celles-ci allaient à des vitesses bien trop grandes. Elles ne devraient normalement pas subsister à leur déplacement trop rapide, selon les lois connues de la physique. Il semblait impossible que toutes les étoiles et le gaz puissent lier les galaxies entre elles, pourtant l'amas restait intact. Zwicky arriva donc à la conclusion que quelque chose d'invisible devait exister et être la source de l'attraction gravitationnelle manquante.

Si aujourd'hui cette théorie est acceptée par la plupart des astrophysiciens, à l'époque elle ne suscita guère d'émoi. Les autres astronomes pensaient qu'en étudiant davantage les mouvements des galaxies on trouverait la réponse au mystère ; mais loin de disparaître la théorie se fortifia pour devenir très attirante dans les années 70. En effet les amas n'étaient plus les seuls à sembler contenir cette substance mais également les galaxies individuelles.

Quelles preuves pour cette matière noire ?

Les étoiles extérieures et intérieures tournent à la même vitesse.

Imaginez une galaxie spirale : la plus grande partie de sa masse semble être concentrée au milieu de la galaxie. On s'attend naturellement à ce que les étoiles de cette galaxie tournent autour de ce centre massif de la même manière que les planètes de notre système solaire tournent autour du Soleil. On s'attendait également, toujours comme dans notre système, à ce que les étoiles extérieures tournent plus lentement que celles qui sont plus proches du centre de la galaxie, du bulbe.

Pourtant, en observant notre Galaxie, on s'aperçoit que les étoiles extérieures tournent aussi vite que les autres. Ce n'est pas normal car dans ces périphéries la quantité de matière est beaucoup moins importante donc l'attraction gravitationnelle aussi. En bref, nos étoiles devraient être éjectées. Or elles filent sur leur orbite, ne se souciant pas du manque d'attraction. La seule explication est qu'un autre type de matière existe, empêchant ces étoiles de partir à la dérive, s'étendant bien au delà du centre.

Chaque galaxie spirale doit donc être entourée d'un halo de matière noire. Pour pouvoir exercer suffisamment d'attraction sur les étoiles situées aux limites des galaxies, la masse de la matière noire doit être au moins cent fois supérieure à celle de la matière visible. Les autres types de galaxies, les elliptiques et les irrégulières possèdent aussi des halos de matière noire.

La matière noire explique la présence de grumeaux dans l'espace.

La matière noire nous sert aussi à élucider une grande énigme : comment, à la suite du Big Bang, l'univers a-t-il évolué d'un état de soupe infime de particules à une structure actuelle, grumeleuse de superamas et de galaxies ?

En effet, bien que 14 milliards d'années se soient écoulées depuis cette durée, celle-ci est insuffisante pour que la matière visible ait à elle seule pu former les gigantesques structures cosmiques que l'on observe aujourd'hui.

Pour répondre à cette question les scientifiques prennent pour hypothèse que l'univers contient un type spécial de matière noire: la *matière noire froide* qui se déplace plus lentement et se regroupe en masses compactes plus rapidement que la matière ordinaire visible. Répondant à l'attraction de cette matière exotique, la matière ordinaire a formé les étoiles et les galaxies à l'intérieur des concentrations les plus denses de cette matière sombre. Cette théorie expliquerait pourquoi chaque galaxie semble incrustée dans son propre halo de matière noire.

L'univers est uniforme à grande échelle.

Il y a une autre preuve à l'existence de la matière noire : l'univers, aux grandes échelles est semblable dans toutes les directions et conserve le même aspect d'un bout à l'autre. Ces deux propriétés indiquent que l'univers possède juste la bonne densité de matière appelée densité critique. La quantité de matière visible est insuffisante pour atteindre ce seuil et la matière noire comblerait le manque. Selon cette hypothèse l'univers serait donc majoritairement composé de matière noire. En comparaison, les galaxies "flotteraient" dans la matière noire comme des grains de poussière dans le vent...

De quoi se compose la matière noire ?

De manière générale, les astronomes divisent la matière noire en deux catégories: la matière noire baryonique et la matière noire non baryonique.

La matière noire baryonique:

Elle pourrait être composée de la même substance que les étoiles, les planètes ou les humains, c'est à dire de particules de la famille des baryons (neutrons, protons... les particules qui composent les noyaux des atomes). Elle pourrait inclure des gros morceaux de substance telle que la poussière, des astéroïdes ou même des naines brunes ou blanches... Ces grumeaux de matière sont appelés des **MACHOS** : *Massive Compact Halo Objects* : objets compacts massifs du halo. Cette matière noire serait donc celle qui entoure les galaxies, mais elle ne peut pas expliquer à elle seule la structure de l'univers.

Dans les années 80 et 90, le neutrino avait suscité un grand espoir. D'abord, parce qu'on était sûr de son existence. Ensuite, parce que l'Univers en est littéralement gorgé. Il suffisait donc qu'il ait une masse même petite pour pouvoir être la matière sombre.

Malheureusement, l'expérience japonaise Super-Kamiokande a révélé, en 1998, que le neutrino ne représente que 20% de la masse manquante.

Les objets massifs sombres, détectés grâce aux lentilles gravitationnelles, ne peuvent pas également expliquer à eux seuls l'énorme masse manquante de l'Univers.

Les deux programmes EROS et Macho ont, en effet, révélé que les objets compacts sombres ne représentent pas plus de 15% de la matière noire

La matière noire non baryonique.

Il y a donc une autre possibilité : de la matière noire composée d'un grand nombre de particules subatomiques dont l'existence n'est que supposée (à part les neutrinos qui, s'ils ont une masse pourraient en constituer une petite partie) : l'axion (une sorte de trou noir miniature

100 milliards de fois plus léger qu'un électron). Le partenaire du quark : le squark. Le partenaire du photon: le photino... Il est en effet possible que pendant le Big Bang de nombreuses particules de matière sombre aient survécues et que quelques unes soient encore là aujourd'hui (Il est également possible qu'il y ait d'autres particules bien plus lourdes, dix fois plus qu'un proton). Ces particules sont appelées **WIMP** (WIMP sigle de *Weakly Interactive Massive Particle*: particule massive à interaction faible, mais "wimp" veut aussi dire "mauviette").

Partout dans le monde on construit des détecteurs ultra-sensibles pour tenter de trouver une trace de cette fameuse matière sombre, par exemple en fracassant des atomes, ce qui crée brièvement l'énergie, la densité et la chaleur qui existaient dans les débuts de l'univers.

Quand un WIMP passe il réchauffe légèrement les atomes qu'il traverse. C'est pourquoi on a construit des détecteurs. Ceux-ci sont souterrains pour réduire l'effet des rayons cosmiques, blindés avec du plomb pour réduire la radioactivité naturelle provenant des murs, refroidis à une température proche du zéro absolu pour réduire le mouvement des atomes dû à la température croissante.

Présents en très grandes quantités dans l'Univers, les WIMPs pourrait résoudre le problème de la masse manquante.

A condition qu'ils existent, car, pour l'instant, les Wimps ne sont que des concepts théoriques.

Leur détection mobilise une vingtaine de groupes de recherche de part le monde, dont la collaboration française EDELWEISS.

Pour se débarrasser des rayons cosmiques qui bombardent régulièrement la Terre, l'équipe française s'est réfugiée à 1800 m de profondeur, au laboratoire souterrain de Modane en Haute-Savoie. Elle tente ainsi, depuis 1992, de détecter les collisions de Wimps avec la matière ordinaire. En fait, lorsqu'ils interagissent avec la matière ordinaire, c'est à dire presque jamais, les Wimps se contentent de heurter un atome qui va reculer tout en libérant de l'énergie qui se manifeste par un très faible courant électrique (causé par le déplacement des électrons) et un infime réchauffement (d'un millionième de degré) du détecteur qui est un cristal de germanium refroidi à une température de quelques millikelvin, soit à peu près - 273°C.

On espère ainsi, détecter les Wimps à une fréquence d'un Wimp par jour et par kilogramme de détecteur.

Mais les physiciens ont toujours du mal à éliminer les parasites et impuretés radioactives, qui en se désintégrant brouillent le signal que l'on veut récupérer.

Ils placent, toutefois, beaucoup d'espoir dans le nouveau détecteur Edelweiss 2, plus sensible et mieux protégé contre les parasites.

Les MACHO, eux, agissent comme des lentilles dans l'espace. En effet ils modifient le trajet de la lumière et il suffit ainsi de détecter les variances d'éclat d'étoiles pour les détecter. Les astronomes ont enregistré plusieurs événements d'étoiles dont l'éclat augmente brusquement puis diminue, mais seulement un nombre très faible.

Si, par hasard, un amas de galaxie se trouve sur la route de la lumière d'une autre galaxie, alors il va tordre et déformer cette lumière en créant des images multiples du corps en arrière plan. Sur Terre, on observe qu'un halo de ces images fantômes se forme sur les bords de l'amas. Pour créer le motif exact de ces images observées, il faut que la masse de l'amas qui intervient soit répartie d'une manière particulière. Étant donné que la plus grande partie de la

masse de l'amas est composée de matière sombre, ce processus révèle dans quelle mesure la matière noire y est concentrée.

Cette mystérieuse matière noire est donc omniprésente dans l'univers, avec un rôle vital. La comprendre permettrait de connaître l'univers, son passé, son présent et son avenir.

Énergie sombre et amas.

Tout n'est pas rose pour la théorie de l'énergie sombre ; alors que la plupart des astrophysiciens semblaient d'accord pour considérer cette énergie comme prédominante dans l'univers, des études plus récentes bousculent les théories...

XMM remet en cause l'énergie sombre

Les observations du satellite américain WMAP en avaient donné la quasi-certitude : une énergie sombre existait dans l'univers, et avait une part prédominante dans l'évolution de celui-ci. Mais le satellite européen XMM-Newton vient de chambouler les théories.

Le satellite XMM, observant dans les rayons X, a en effet observé différents amas de galaxies situés à des distances allant jusqu'à 10 milliards d'années lumières. Mais, surprise, les observations montrent que les amas étaient moins nombreux à l'époque qu'aujourd'hui, ce qui serait l'indice d'une densité de matière plus élevée que prévue dans l'univers.

Résultat : d'après les conclusions du XMM-Newton Omega Project, dans un article remis au journal scientifique *Astronomy and Astrophysics*, l'énergie sombre pourrait devenir tout simplement inutile, obligeant à réviser une grande partie des théories cosmologiques en vigueur.

Jusqu'ici l'histoire de l'univers pouvait, grâce à l'énergie sombre être divisée en deux parties : pendant la première moitié, la matière aurait dominé l'univers, donnant naissance à de nombreux amas. Cependant, l'expansion continuant, la densité aurait baissé jusqu'à ce que l'énergie sombre domine l'univers, en constituant aujourd'hui 70%. Les amas stellaires seraient donc de bons indicateurs de la présence de cette énergie dans l'histoire de l'univers. Plus la balance pencherait du côté de la matière, plus ils se formeraient facilement ; dans le cas contraire leur fréquence de formation serait nettement réduite.

Or selon des études récentes, les amas sont beaucoup plus nombreux aujourd'hui qu'à une période se situant environ à la moitié de l'âge de l'univers. Cette conclusion laisse donc supposer que l'univers est aujourd'hui dominé par la matière ; en tout cas bien plus que ce qui était admis dans les dernières théories. Alors... Matière ou énergie sombre ? Loin d'être clos le débat reprend de plus belle. La domination de l'énergie sombre ne serait-elle qu'une illusion ?...