



Réception des Membres élus en 2004 - le 14 juin 2005

Formation des étoiles et des galaxies dans l'Univers
Françoise Combes

Le ciel nous réserve des surprises fascinantes. Alors que le poète y verra des constellations, Orion et son baudrier, Persée chevauchant Pégase et délivrant Andromède, certains y chercheront la solution au mystère de nos origines. Déjà la découverte de plus d'une centaine de planètes extra-solaires nous renseigne sur la formation de notre système solaire.

Explorer nos origines

De même, nous savons aujourd'hui comment et quand se sont formées les étoiles qui nous entourent, et comment se forment les galaxies, que l'on compte par milliards comme la Voie Lactée. Il apparaît parfois plus simple de connaître comment se sont formées les galaxies et les étoiles qui nous entourent, que de percer le mystère de l'apparition de la vie il y a des milliards d'années.

Avec la machine à remonter le temps que représentent nos télescopes, il est possible aujourd'hui de s'approcher du Big-Bang, et remonter jusqu'à 95% de l'âge de l'Univers. On peut ainsi étudier en direct la formation des premières galaxies. On s'aperçoit clairement que les galaxies se forment progressivement, à la fois de façon hiérarchique, par coalescence et fusion de galaxies plus petites, et aussi par accréation de matière intergalactique, les galaxies n'étant pas des systèmes isolés, mais faisant partie d'un grand réseau de filaments cosmiques qui les alimentent comme un cordon ombilical.

Matière invisible

Un des plus grands mystères que nous avons à résoudre est de savoir de quoi est constituée la majeure partie de la matière dans l'Univers. S'il est facile de voir les étoiles qui brillent, ou le gaz qui rayonne, très vite on s'aperçoit que la matière visible ne représente qu'un ou deux pour cent de la matière totale. La matière invisible, ou matière obscure, nous ne pouvons que la peser par ses forces de gravité, qui impriment des vitesses à la matière visible.

Cette matière obscure doit être de deux sortes : une partie doit être de la matière ordinaire, des atomes, dont seulement 10% sont visibles par rayonnement. La densité totale d'atomes dans l'univers est en effet connue par la nucléosynthèse primordiale, et par les anisotropies du fond de rayonnement cosmologique. Cela implique que 90% de ces atomes sont obscurs et sous forme inconnue encore. Nous avons proposé, avec Daniel Pfenniger de l'Observatoire de Genève, que la plupart de ces atomes invisibles existent sous forme de gaz d'hydrogène moléculaire froid, donc obscur. Cette molécule est symétrique et ne rayonne pas, lorsqu'elle est aux températures du milieu interstellaire, c'est à dire de l'ordre de 10 degrés Kelvin (-263 degrés Celsius). Dans notre modèle, le gaz moléculaire obscur est distribué comme le milieu interstellaire visible, c'est à dire un ensemble fractal de nuages structurés par la gravité, entre une masse de Jupiter et un million de masses solaires (soit 9 ordres de grandeur en gamme d'échelle). Nous avons publié ces prédictions il y a 10 ans, et avons le bonheur aujourd'hui de

constater qu'une grande partie de ces nuages ont pu être observés indirectement dans le voisinage du Soleil, par leurs interactions avec les rayons cosmiques.

Dans cette hypothèse une grande partie de la matière manquante au niveau de la Voie Lactée et des galaxies en général pourrait être de nature atomique. Mais cela ne suffit pas, car les galaxies, du moins dans leur partie visible, ne contiennent qu'une faible partie de toute la matière. Où sont passés les atomes restants? Sans doute dans les filaments cosmiques, mélangés avec la deuxième sorte de matière obscure, la matière exotique, de nature complètement inconnue.

Formation des étoiles

Les simulations numériques cosmologiques que nous entreprenons aujourd'hui permettent de mieux comprendre le scénario de formation des étoiles et des galaxies : ces simulations prennent en compte la matière obscure exotique, nécessaire pour former les structures très tôt dans l'univers. Ces structures créent les puits de potentiel, dans lesquels vont s'effondrer les atomes dès qu'ils se recombinaient, de protons+électrons en atomes d'hydrogène. Cette recombinaison survient 300 000 ans après le Big-Bang. Les premières étoiles, issues du gaz primordial qui ne possède pas encore d'éléments lourds, comme le carbone, azote et oxygène, sont extrêmement massives, consomment leur combustible très vite, et sont tellement énergétiques qu'elles soufflent le gaz environnant, ce qui ralentit la formation d'autres étoiles. C'est donc progressivement que les autres étoiles et les galaxies vont se former, à l'occasion notamment de l'interaction entre galaxies. Les galaxies se forment peu à peu par accréation des filaments, qui les alimentent en atomes le long de l'âge de l'Univers. Le taux de formation des étoiles a ainsi connu un pic d'activité vers le milieu de l'âge de l'Univers (il y a 6 milliards d'années), puis s'est calmé. Par exemple la Voie Lactée, qui contient environ 200 milliards d'étoiles, ne forme plus que deux ou trois nouvelles étoiles par an.

Formation concomitante des galaxies et de leur trou noir central

Le mécanisme qui permet aux galaxies de grossir en avalant de plus en plus de gaz, repose sur les instabilités en forme de barres et de spirales. Notre équipe a pu montrer par des simulations numériques que la morphologie d'une galaxie change de façon intermittente, à chaque fois qu'une nouvelle barre apparaît ou disparaît, à la racine des bras spiraux. La barre canalise le gaz vers le centre, provoquant à la fois une flambée de formation d'étoiles, et nourrissant un trou noir central. C'est ce trou noir central qui est à l'origine du phénomène de quasar. Aujourd'hui l'existence d'un trou noir super-massif est établie dans le noyau de chaque galaxie. Le processus d'évolution des galaxies est régulé d'abord par les instabilités dynamiques alimentant le trou noir, puis par l'énergie formidable rendue au milieu environnant par le quasar qui contrôle le taux d'accréation.

La cosmologie a connu ces dernières années une révolution : de science spéculative, elle est devenue une science précise, qui donne un contexte rigoureux aux théories de formation des galaxies. Pourtant on réalise le chemin à parcourir, lorsque l'on constate que la matière ne constitue que le tiers du contenu de l'Univers, les deux autres tiers étant de l'énergie qui accélère l'expansion de l'Univers. Non seulement il nous reste à élucider la nature de la matière obscure, mais aussi celle de l'énergie noire, un formidable défi.