

Comprendre l'Univers

En 1931, le chanoine belge Georges Lemaître tente de réunir la théorie à l'observation dans un modèle d'univers : ce sont les prémices de *la théorie du big bang* (ce nom avait été donné par dérision en 1948 par un opposant à cette théorie, l'anglais Fred Hoyle).

Cette théorie récente, semble être acceptée par la plupart des astronomes, les découvertes observationnelles allant toutes dans le sens de l'hypothèse du big bang. Elle est pourtant difficile à appréhender car elle suppose qu'à un instant donné, l'univers était infiniment petit, d'une densité et d'une température infinies ; c'est ce que les physiciens appellent une singularité. D'autre part, les concepts de temps, d'espace, et de matière ne semblent pas avoir de sens avant le big bang.

Les dernières évaluations situent l'âge de l'univers à 13,7 milliards d'années.

La physique théorique actuelle explique l'évolution de l'univers à partir d'un temps de 10^{-43} seconde après le big bang. Son évolution jusqu'à un âge de 270 000 ans fait intervenir la physique de l'infiniment petit, physique étudiée essentiellement dans les accélérateurs de particule.

- **jusqu'à 270 000 ans** : l'univers est une "soupe" de rayonnements très énergétiques et de particules de matières, protons, neutrons et électrons qui s'annihilent avec la même quantité d'antimatière. La matière étant en proportion supérieure, le reste forma le futur Univers.

Les premiers noyaux se forment par la réunion de protons et de neutrons ; c'est la nucléosynthèse primordiale. Les photons restent prisonniers car ils interagissent en permanence avec des particules de matière.

- **après 270 000 ans** : la température ayant suffisamment baissé, les premiers atomes se forment. Des électrons se combinent avec des noyaux déjà formés.

C'est à ce moment que l'univers devient transparent et que la première lumière s'échappe. Cette lumière a été détectée dès les années 60: on l'appelle *le fond diffus cosmologique* ou *rayonnement fossile*. Ce rayonnement a été étudié ces dernières années par les satellites COBE et WMAP. Ces études ont permis de détecter d'infimes différences de température donc de densité, qui seraient à l'origine des grandes structures futures de l'univers comme les galaxies et les amas de galaxies.

- **1 milliard d'années après le big bang** : il semble que les plus anciennes galaxies et étoiles se soient formées à cette époque.

- **Il y a 10 milliards d'années** : formation de la Voie Lactée.

- **Il y a 5 milliards d'années** : formation du Soleil et du système solaire.

- **Dans 5 milliards d'années** : mort du Soleil.

L'avenir de l'univers est très difficile à pronostiquer. Allons-nous vers un univers en perpétuelle expansion, voire en expansion accélérée comme le soutiennent certaines découvertes récentes ? Il deviendrait alors toujours plus grand et plus froid.

Ou l'Univers est-il "fermé"? L'expansion serait alors ralentie par la densité de matière qu'il contient, pour finalement s'inverser, l'Univers finissant dans un "big crunch", sorte de big bang à l'envers.

Ces questions restent ouvertes, d'autant plus que la matière visible par nos chercheurs ne représente qu'un faible pourcentage de la matière totale supposée de l'Univers. 95 % de la masse de l'Univers semble exister sous forme d'une matière non lumineuse : c'est la "*matière noire*" dont nous ne connaissons pas la nature.

La formation de l'Univers

La cosmologie, la science qui étudie l'évolution de l'univers dans son ensemble, remonte à l'éveil de l'astronomie, en Mésopotamie et en Egypte, mais aucune preuve observationnelle ne permettait de confirmer les postulats.

A l'époque de Platon par exemple la "Science" n'existait pas et la véritable connaissance était de nature philosophique, la compréhension de la "cause première", s'alliant au besoin mais le plus souvent aucune expérimentation. Il faudra pratiquement attendre le XVII^{ème} siècle et le développement des techniques d'observation pour que les philosophes, physiciens et astronomes proposent leur conception de l'Univers, à travers des hommes tels Descartes, Newton, Wright, Kant, Mach et consorts. Plusieurs théories ont vu le jour mais bien peu apportaient une réponse analytique, les outils théoriques et de mesure étant inexistantes ou à peine ébauchés. Au fil du temps, dans les laboratoires ou l'oeil rivé à l'oculaire des télescopes, les physiciens et les astronomes accumulèrent une charge d'événements considérables à expliquer.

Tout bascula au début du XX^{ème} siècle lorsque les théories furent progressivement étayées par les observations de l'Univers dans le rayonnement radioélectrique puis infrarouge. En l'espace de quelques décennies toutes les croyances primitives ont été balayées. Ces faits expérimentaux permirent aux cosmologistes de travailler sur des modèles d'Univers. Ceux-ci, quelquefois à l'avant-garde de la science et moyennant certaines incertitudes sont en parfait accord avec les observations.

L'expansion de l'Univers

La véritable cosmologie date du XX^{ème} siècle. Toutes les conceptions antérieures, malgré un bon sens évident étaient empiriques. Les astronomes se basaient tout au plus sur des observations trop imprécises ou à la limite de la résolution de leurs instruments que pour réellement poser les jalons d'une étude scientifique.

En travaillant sur les spectres de celle qu'on dénommait encore la "nébuleuse d'Andromède" M31, en 1912 l'astronome américain Vesto Slipher nota un léger décalage de ses raies d'absorption par rapport à l'état stationnaire d'un élément équivalent mesuré en laboratoire. En deux ans il déterminera les décalages Doppler d'une quinzaine de "nébuleuses spirales". Mais il n'exploita pas ses observations. Pourtant ces "redshift" ou décalages vers le rouge des systèmes de raies indiquaient que certaines galaxies s'éloignaient de nous - de la Voie Lactée - à plus de 1800 km/s.

Les études sur les spectres s'étalèrent sur dix années si bien qu'avant la découverte de la "récession des galaxies", une première théorie cosmologique fut proposée en 1917 par Willem

De Sitter : le modèle stationnaire. En fait l'Univers mathématique de De Sitter ne contient pas de matière, il n'y a pas de mouvement. Mais il suffit d'y incorporer quelques particules pour créer des perturbations ; le modèle s'anime, devient instable suite à l'effet gravitationnel, imposant le rapprochement ou la fuite des éléments proportionnellement à leur distance. Il devient dynamique.

Mettons-nous à la place d'Einstein, qui élabore une équation. Il sait que cette équation est dynamique car elle est construite à partir des équations de la gravitation qui donne sa forme et la dynamique de l'espace-temps. En d'autres termes, si elle représente l'univers réel et si l'univers contient de la matière, celle-ci obéit aux lois de la gravitation. Cela signifie aussi que l'univers serait en expansion. L'Univers aurait donc connu un début avec toutes les conséquences que cela impose.

Einstein ira à l'observatoire du mont Wilson et demandera aux astronomes s'ils avaient détecté un mouvement global de récession des galaxies. Mais à cette époque, on réalisait à peine les premiers spectres extragalactiques si bien que les astronomes lui répondirent qu'ils n'avaient encore rien détecté de particulier. Einstein en conclut que l'univers était statique.

Rejetant la solution de ses équations, pour résoudre cette difficulté Einstein imagina alors un principe d'isotropie, où la métrique était invariable, le rayon de courbure de l'Univers étant constant. Il introduisit une nouvelle force capable de résister à l'attraction gravitationnelle, la force de répulsion gravitationnelle du vide, baptisée la constante cosmologique. Très faible elle ne se manifeste que sur de grandes distances cosmologiques. A grande échelle en effet, l'énergie du vide a un effet gravitationnel non négligeable sur la géométrie de l'Univers. Plus la constante cosmologique est grande, plus les distorsions spatio-temporelles sont évidentes sur la distance considérée.

Cette constante cosmologique avait déjà été utilisée par Friedmann mais elle nécessitait un choix particulier de conditions initiales pour se conformer à l'univers statique d'Einstein.

Cette constante L impose du même coup que l'univers se vide de matière, puisque celle-ci n'a plus aucun effet et ne courbe plus l'espace-temps. Il était aussi fermé, c'est-à-dire qu'en partant droit devant lui, un observateur situé à la surface de l'Univers reviendrait à son point de départ après avoir parcouru une circonférence complète (en théorie, car en pratique il n'aurait probablement jamais le temps de terminer son tour). Einstein rejoignait l'idée du philosophe autrichien Ernst Mach qui recherchait une théorie du champ totale capable d'unifier les propriétés d'inertie de la matière et la distribution d'énergie dans l'Univers.

Malheureusement pour Einstein, Friedmann démontra à partir de 1922 qu'en supprimant la constante cosmologique il apportait de nombreuses solutions au problème des décalages spectraux analysé par Hubble. L'Univers restait homogène et isotrope mais au lieu d'être fermé et statique il devint dynamique, affecté d'un mouvement d'expansion. Il expliqua le déplacement des raies observé dans les spectres obtenus par Slipher et Hubble en considérant que les spectres des galaxies offraient un décalage spectral d'autant plus important qu'elles étaient éloignées. Friedmann corrigea la théorie d'Einstein en liant le rayon de courbure de l'Univers à une fonction simple du temps : $t^{1/2}$ si la densité de l'énergie est supérieure à la densité de la matière, $t^{2/3}$ si la matière prédomine, conformément à la Relativité générale. Il s'ensuit qu'à un moment déterminé du passé, l'Univers s'est trouvé concentré en un point unique.

Dans le nouveau modèle d'Univers de Friedmann, si la densité de la matière est supérieure à la densité critique, l'espace se courbe sur lui-même permettant aux lignes parallèles de converger. Plus significatif, dans ce cas la gravité peut ralentir l'expansion de l'Univers et le

forcer à décélérer jusqu'à entraîner une phase de contraction dénommée le "Big Crunch". Dans ce cas l'Univers devient elliptique et fermé.

Le facteur de décélération permettant à l'Univers de se contracter est égal au rapport du rayon de courbure actuel de l'Univers sur le rayon de courbure estimé. Il est fixé à 1/2. Il signifie qu'en deçà de 0.5 la décélération est assez faible pour que l'expansion se poursuive indéfiniment. Obéissant à la loi de Hubble, dans ce cas la vitesse des galaxies dépasse la vitesse de libération. La densité de la matière devient négligeable et la taille de l'Univers augmente proportionnellement à la puissance $2/3$ du temps.

Einstein, certain que les équations qui décrivaient l'état de l'univers devaient avoir une solution statique, indépendante du temps, pensa que l'article de Friedmann était erroné.

Informé de l'avis d'Einstein par son collègue Krutkov alors aux Pays-Bas, Friedmann écrivit une lettre à Einstein en décembre 1922, dans laquelle il développa ses calculs et présenta la preuve de l'exactitude de ses résultats, demandant à Einstein s'il lui était possible de publier un addendum à sa note précédente ou un extrait de sa présente lettre. Il semble qu'Einstein n'ait pas attaché beaucoup d'importance à cette lettre, étant quasiment certain que Friedmann s'était trompé.

En mai 1923, Krutkov rencontra Einstein chez Paul Ehrenfest, à Leiden et finit par persuader Einstein que Friedmann avait raison.

Cette solution sera confirmée par les observations précises d'Edwin Hubble qui devait démontrer en 1927 que le décalage vers le rouge du spectre des galaxies représentait bel et bien un effet Doppler et ne souffrait aucun terme correcteur : l'univers était bien en expansion et les galaxies suivaient ce mouvement par inertie. Einstein reconnu qu'il avait fait "*la plus grande erreur de sa vie*".

Par la suite Einstein continua de reconnaître l'importance du travail de Friedmann dans le développement de la cosmologie moderne. Il écrivit notamment en 1931 : "*Friedmann... fut le premier à débiter dans cette voie*".

L'Univers est-il fini ou infini ?

"*C'est une question que seuls les imbéciles se posent*" répondit Einstein en plaisantant. Depuis Aristote, on s'est souvent posé la question de savoir ce qu'il y avait à l'extrémité du ciel. Pouvait-on encore tendre un bâton ? Si vous répondiez oui, l'univers était donc infini et l'idée même devenait une question métaphysique.

La forme du "monde" a de tout temps chatouillé notre curiosité. Si on considère que l'Univers est fini, le sens commun nous laisse supposer que cet Univers doit se trouver dans une enceinte. On peut donc imaginer qu'un jour nous localiserons cette limite de l'Univers et son contenant. Malheureusement comme ce l'est souvent en science, cette idée est naïve.

A l'inverse, alors que l'homme cherche toujours à compter ce qu'il observe, la notion d'infini résiste toujours à représenter logiquement le monde. Hors d'atteinte, l'infini n'est pas mesurable, ce n'est donc pas un nombre mais un concept immatériel. Mathématiquement l'infini cache quelque chose d'erroné, sans parler des paradoxes et ambiguïtés qu'il entraîne lorsqu'on assimilation cette expression mathématique avec la réalité. Nous y reviendrons lorsque nous discuterons de la philosophie des sciences.

Pourtant les physiciens rationalisent l'Univers et parlent en termes d'infini. La question de savoir si l'Univers est fini ou infini est donc une antinomie, c'est-à-dire une expression qui contient en elle-même sa propre contradiction. Ce paradoxe ne trouva de réponse qu'au XIX^{ème} siècle avec le développement des géométries non-euclidiennes : une sphère par exemple est un espace fini mais sans bord.

Ce caractère fini ou infini dépend donc de la forme globale de l'espace, de sa topologie. Mais cet aspect est souvent négligé par les cosmologistes qui ne considèrent que la courbure de l'espace. C'est ici qu'interviennent les équations de la Relativité générale, la meilleure théorie que nous ayons jusqu'à présent pour calculer cette courbure.

Malgré ce paradoxe, l'Univers peut donc être représenté par différents modèles géométriques que nous allons utiliser tout au long de ses pages. Aristote, Dante ou Halley pensaient que le "monde" était fini. Démocrite, Lucrèce ou Newton le croyaient infini. A contre coeur, il faut bien avouer que deux mille ans plus tard nous ignorons toujours la réponse. Seuls la terminologie et notre point de vue ont changé : nous ne parlons plus de *Monde* mais *d'Univers* et nous préférons nous rapprocher du langage mathématique et utiliser les termes d'Univers *fermé* et *ouvert* aux Mondes *fini* et *infini*, question de précision du langage.

Depuis les nombreuses découvertes faites au début du siècle, quelques tendances se démarquent en faveur d'un Univers plat, ouvert ou fermé qui nous incitent à reposer la place de l'Homme dans cet ensemble.

En 1915 Einstein avait osé affirmer que les équations qu'il avait inventées représentaient l'Univers réel. Mais les techniques de l'époque ne permirent pas de vérifier tous ces propos. Les théories cosmologiques modernes admettent les principes énoncés par Einstein, mais les équations de la Relativité générale sont si difficiles à résoudre qu'il est souvent nécessaire de simplifier les modèles pour clarifier les nouveaux concepts. Tout se simplifie si l'on admet que l'Univers a les mêmes propriétés dans toutes les directions (isotrope) et que la matière est uniformément distribuée (homogène); l'espace adopte une courbure constante qui simplifie les calculs théoriques.

Sur ce principe, dès 1922 le mathématicien et météorologiste russe Alexandre Friedmann envisagea différents modèles d'Univers qui seront confirmés en 1927 par l'abbé Belge Georges Lemaître et en 1935 par les astrophysiciens américains H. Robertson et A. Walker, modèles connus sous l'acronyme de "modèle FRW".

L'univers a-t-il un centre ?

Nous avons l'habitude de dire que l'Univers a commencé avec le Big Bang et s'est ensuite dilaté. C'est une métaphore mais tout le monde comprend bien ce qu'elle représente, ou presque.

Car à travers cette image se pose tout naturellement la question de savoir où se trouve le centre de l'Univers à partir duquel tout a commencé... ?

C'est ici que la métaphore trouve ses limites et fausse notre jugement. Que l'univers dans son ensemble soit ouvert ou fermé il n'a pas de centre, ou plutôt le centre est... partout !

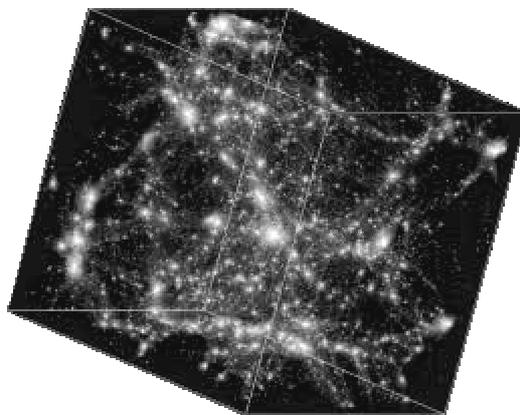
En effet, imaginer la Terre. C'est une surface sphérique, autrement dit un espace fini ou fermé mais sans limite car on peut en faire le tour indéfiniment sans jamais en voir la fin. Placez-vous au sommet d'un gratte-ciel. De votre point de vue, l'horizon s'étend autour de vous à 360° et par un effet de perspective les grands boulevards semblent s'éloigner à partir de la tour.

En fait vous voyez le monde comme si vous étiez au centre de l'univers. Depuis le sommet des gratte-ciel de Tokyo ou de New-York vous auriez exactement la même impression. Tout point de la surface terrestre peut donc être considéré comme le centre du monde, ce que les anciens Grecs avaient imaginé, trompé par les apparences. Le même principe s'applique à l'univers.

L'infinitude spatio-temporelle des univers multiconnexes

Le cube est-il un hexaèdre ? Du point de vue topologique, la forme de l'espace dépend de sa surface globale. Ainsi, la projection ad hoc d'un cube sur un plan dessine un hexagone parce que le cube est un espace multiconnexe dont les faces sont identifiées deux à deux selon certaines transformations géométriques.

C'est dans ce cadre que l'on peut se poser la question : l'Univers serait-il un espace multiconnexe ? Dans l'affirmative nous devrions observer dans différentes directions de l'espace des images fantômes des corps célestes (il ne s'agit pas de mirages gravitationnels). On ne pourrait pas les distinguer des véritables objets car leur éclat, leur forme et leur stade évolutif pourraient être différents en fonction de la "projection" résultante.



Un Univers multiconnexe (P.Quinn, G.Salmon)

L'Univers pourrait ainsi présenter une dimension spatiale très étendue. Mais ce serait une illusion provoquée par les reflets démultipliés d'un monde multiconnexe réduit à quelques millions d'années-lumière.

A ce jour, dans l'environnement du superamas local il n'existe pas d'images fantômes des galaxies voisines, mais rien ne nous permet d'affirmer que dans l'infinitude spatio-temporelle l'univers ne serait pas multiconnexe.

Ce concept posant des problèmes aux mathématiciens comme aux physiciens, ces derniers essayent d'éliminer ce concept d'infini de leurs théories.

Le concept d'espace-temps

Tel un explorateur parvenu dans un pays légendaire, ce mot composé miroite à nos yeux comme une passe-partout pour la relativité, permettant de toucher du bout des doigts les

avant-postes d'une *Terra Incognita*, la cosmologie. Mais que représente au juste ce concept d'espace-temps ?

A l'époque de Newton et de la découverte de l'expérimentation, l'Univers était éternel, sans âge. Le temps était une variable indépendante dont il était impossible d'infléchir la course. Les savants pouvaient appréhender l'espace, mesurer des distances, peser des masses, calculer le temps écoulé. Ils appréciaient des événements absolus.

En "inventant" la gravitation, Newton en fit une loi universelle qui s'appliquait partout et toujours. C'est une loi dynamique, réversible. Il n'y a aucune différence entre le film du mouvement d'une planète dans le sens direct et le même mouvement filmé à l'envers. Les deux phénomènes sont équivalents.

Conscient de certaines anomalies des théories classiques, en 1905 Einstein intégra cette loi dans sa théorie de la Relativité restreinte. Les équations d'Einstein décrivent un Univers où l'espace est lié au temps, que Minkowski a convenu d'appeler le "continuum espace-temps". Einstein postula également l'existence d'une vitesse limite dans le vide, c'est la vitesse de la lumière. En même temps l'écrivain français Gaston de Pawlowski écrivait son "Voyage au pays de la 4^{ème} dimension", précurseur d'un thème devenu classique depuis.

Deux siècles auparavant, Newton avait déjà démontré que l'Univers contenait 4 dimensions, mais il n'avait pas établi de lien entre l'espace et le temps. La loi de Newton permettait à la gravitation d'agir instantanément à distance, une propriété étonnante qu'il jugea tout d'abord d'essence divine puis tout de même "absurde" sans la médiation d'un support matériel devait-il reconnaître quelques années plus tard.

Pour Einstein, le fait de lier l'espace et le temps signifie que ni les distances, ni les durées ne sont absolues, la perception du temps dépendant avant tout de la vitesse de celui qui le mesure. L'aventure du voyageur de Langevin nous a donné la preuve de la modification du temps, vérifiée depuis par de nombreuses expériences. Le plus souvent ces résultats sont insolites, mettant notre crédulité à l'épreuve, car ils concernent des événements qui ne se produisent pas dans la vie de tous les jours ou inobservables à l'oeil nu.

La théorie d'Einstein, comme toutes les lois de la physique, n'est qu'une approximation. Mais elle est suffisante pour décrire la structure actuelle de l'Univers. Cela dit la Relativité est une science adulte, dont la maturité lui permet de poser ses propres lois et de répondre à ses détracteurs.

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 les 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 hyper massif 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 (voir chapitre précédent). 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.

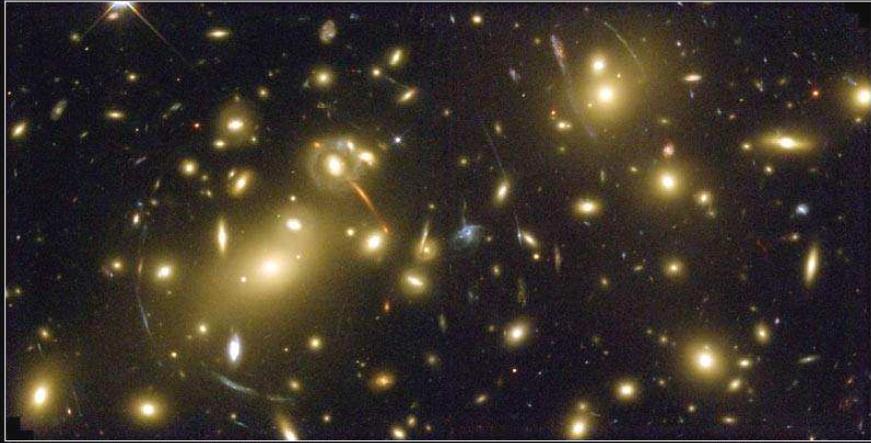
Les collisions de galaxies entraînent un autre phénomène : les gaz et les poussières présents dans les galaxies d'origine donnent naissance à énormément d'étoiles : Ce sont les *flambées stellaires*. Il semble que La Voie Lactée soit actuellement en train "d'avalier" une galaxie naine ; le phénomène 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 de grandes zones de vide.



Galaxy Cluster Abell 2218

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08

HST • WFPC2