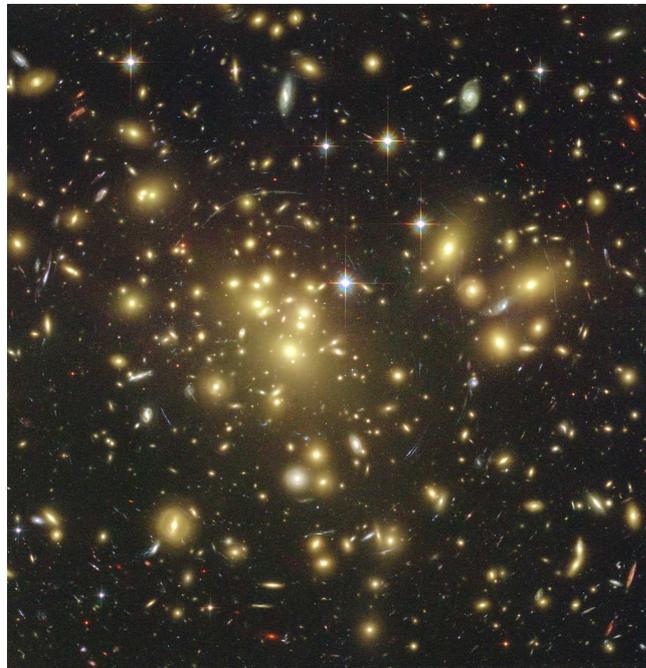


L'organisation et la structure de notre Univers

Mercredi 8 août



L'Univers est peuplé de milliards d'étoiles, mais celles-ci ne vivent pas seules : elles sont regroupées en galaxies, elles-mêmes regroupées en amas puis en super-amas. L'Univers apparaît ainsi comme un ensemble hyper structuré, dans lequel les éléments qui le composent interagissent sans cesse.

Alors que les astrophysiciens accumulent de plus en plus de données sur notre Univers et que notre vision du monde a considérablement évoluée depuis un siècle, de nombreuses questions restent en suspens : comment l'Univers est-il apparu ? Comment s'est-il organisé ? D'où vient la matière ?

Le début du 20^{ème} siècle marqua une révolution dans la modélisation de l'Univers et de son histoire.

En 1915, Albert Einstein établit la loi de la relativité générale qui servira de cadre physique à toute la cosmologie moderne.

En 1929, l'astronome américain Edwin Hubble comprend ce qu'est une galaxie et évalue leur distance ; par l'étude de leur spectre, il découvre que la plupart nous fuient, et ce d'autant plus vite qu'elles sont loin de nous. Ces observations vont dans le sens d'une expansion de l'Univers. A cause de leur vitesse d'éloignement, la couleur des galaxies semble tirer vers le rouge. Ce phénomène s'appelle le **Redshift**.

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'année 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.

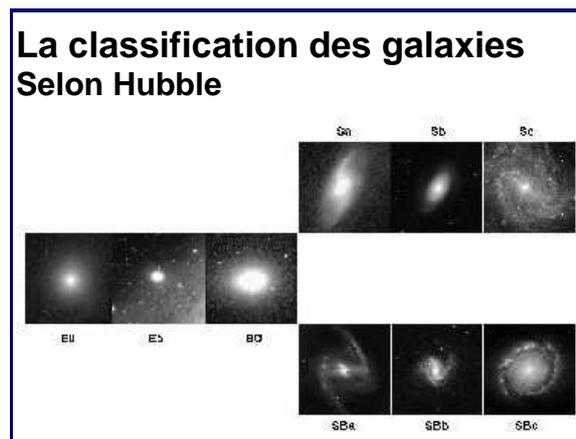
Ou l'Univers est-il "fermé"? L'expansion serait alors ralentie par la masse qu'il contient, pour finalement s'inverser, l'Univers finissant dans un "big crunch", sorte de big bang à l'envers.

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 sombre*" dont nous ne connaissons pas la nature.

La classification des galaxies

Grâce à la découverte d'Edwin Hubble, nous savons aujourd'hui que l'univers contient d'innombrables galaxies semblables à la Voie Lactée. Toutes ces galaxies se situent à des distances supérieures à 2 millions d'années-lumière, l'Amas Local (l'amas dans lequel se situe la Voie Lactée) excepté. Elles sont donc très pâles et occupent un champ de quelques dizaines de secondes d'arc seulement sur la voûte céleste. Les plus faibles d'entre elles se distinguent à peine parmi les étoiles de la Voie Lactée situées au premier plan.

Grâce aux multiples photographies réalisées au télescope du mont Wilson, en 1925 Hubble proposa un système de classification des galaxies qu'il modifia légèrement en 1936 dans son livre "The Realm of Nebulae" avec l'introduction des types SO et SB0 pour tenir compte de galaxies au-delà du type E7 n'ayant pas de structure spiralée. La séquence présentée consiste en une série de galaxies elliptiques allant de la forme globulaire (E0) à lenticulaire (E7), et deux séries parallèles de galaxies spirales, normales (S) et barrées (SB). Chaque série est subdivisée en trois sections, a, b, c en fonction de l'ouverture des bras (ouverts, intermédiaires, serrés).



Cette classification met en évidence une série évolutive dont la progression semble très logique. Ainsi la transition SO et SB0 est fermement établie, de même que l'évolution des galaxies elliptiques E0 en type plus tardif E3 ou E5. Les galaxies irrégulières sont considérées comme la continuation du type Sc.

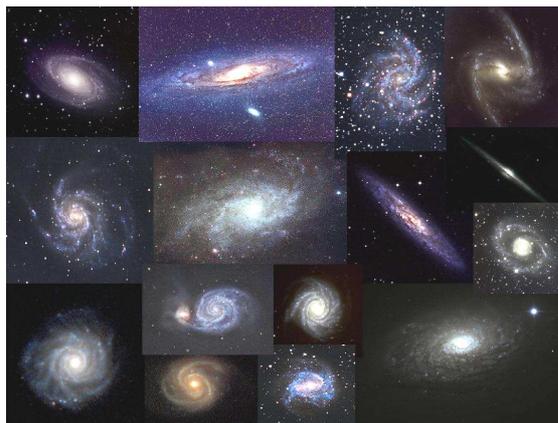
La classification de Hubble est la suivante :

- Les galaxies **elliptiques**, qui présentent une symétrie de rotation complète. Elles sont souvent extrêmement denses que les plus grands télescopes sont parvenus à séparer en

étoiles distinctes. Elles sont classées E0 à E7 selon l'aplatissement du disque. Notons que pour le type E7, l'orientation des axes principaux par rapport à l'axe de visée est toujours inconnue. Nous pouvons citer M32 et NGC 205 les deux satellites de M31, M60, M85, M86, M87, M88, M89 appartenant à l'amas de la Vierge et dont une centaine de membres sont aisément accessibles à l'amateur. La plupart d'entre elles se trouvent au centre des grands amas de galaxies qu'elles illuminent de leurs feux.

- Les galaxies **spirales**, classées S, à noyau important et à bras réguliers et peu développés, ou à noyau moins développé et à bras importants, classées Sa, Sb et Sc. Citons M31, M33, M51, M81, M104 parmi celles qui présentent la plus belle morphologie.
- Les galaxies **spirales barrées**, classées SB, dont les bras partent de l'extrémité d'une barre qui traverse le noyau et classées SBa, SBb, SBc selon l'ouverture des bras. C'est aussi la population la plus nombreuse. La Voie lactée, M58, M83, M95 et M96, NGC 1300 et NGC 1360 appartiennent à cette classe, auxquelles il faut ajouter le Grand Nuage de Magellan, classé SB(s)m.
- Les galaxies **lenticulaires**, classées S0, qui n'étaient pas reconnues dans le document de 1925 de Hubble seraient une forme intermédiaire entre les galaxies elliptiques E7 et les spirales. L'hypothèse proposée par Hubble sera confirmée empiriquement par voie photographique en 1950. Ces galaxies sont symétriques et ne présentent pas de structure spirale ni de barre centrale. Elles présentent un gros noyau central et un disque aplati. Elles ne contiennent pas de gaz ni de poussières. Citons M84, NGC 2685, NGC 3115 et NGC 4477.
- Les galaxies **irrégulières**, classées I, telles M82, le Petit Nuage de Magellan, NGC 2976 qui n'ont pas de forme définie, dans lesquelles se développe une Population I d'étoiles bleues supergéantes. Elles ne représentent que quelques pourcents de toutes les galaxies.

Ces catégories sont complétées par l'adjectif "pec" de **peculiar** lorsque leur morphologie est anormale (superlumineuse, anneau interne ou externe, en interaction avec un compagnon, etc) ou "d" s'il s'agit d'une galaxie naine (dwarf).



En 1959, Gérard de Vaucouleurs révisa la classification des galaxies de Hubble pour tenir compte de caractéristiques plus subtiles mais très importantes pour comprendre leur dynamique. de Vaucouleurs introduisit le type Sd et le type *magellanique* (m) pour assurer la transition entre les galaxies spirales et irrégulières; les galaxies supergéantes (cD) dont le corps elliptique s'entoure d'une enveloppe d'étoiles très étendue; les spirales à *distorsion ovale* ou faiblement barrées (SAB); les galaxies présentant *un anneau* (ring) autour du noyau d'où partent les bras (S(r)) et celle dont les bras partent directement du noyau (S(c)); les galaxies qui présentent un anneau externe, souvent une extension des bras spiraux qui se

rejoignent (RS); enfin les galaxies intermédiaires entre les lenticulaires SO et les spirales SA (A).

Cette classification s'étend dans les trois dimensions et forme un volume lenticulaire :

- sur l'axe longitudinal se trouve la classification étendue de Hubble, E0-E7, SO⁻, SO^o, SO⁺, Sa, Sb, Sc, Sd, Sm, Im
- sur l'axe transversal sont reprises les caractéristiques de l'anneau qui entoure le noyau, AB(s), AB(rs), AB(r)
- sur l'axe vertical ont été reprises les distinctions entre les galaxies normales et les barrées A, AB, B.

Ainsi, pour chaque classe spirale de l'axe "x" et pour ses types intermédiaires, on peut découper une tranche dans la classification révisée de De Vaucouleurs qui se décompose en 8 secteurs auquel s'ajoute un modèle mixte au centre.

En nombre, les 2/3 des galaxies ont une forme spirale, 10% sont elliptiques et 25% lenticulaires. Parmi les galaxies spirales, les 2/3 d'entre elles sont barrées, une moitié faiblement, l'autre fortement barrée. L'exemple résumant le mieux la classification est à nouveau le lointain Quintet de Stephan. Il rassemble : NGC 7318a (E2), NGC 7317 (E4), NGC 7320 (Sa), NGC 7319 (Sb) et NGC 7318 (SBb).

A propos de la morphologie des galaxies

Il existe une corrélation entre la morphologie des galaxies et leur constitution. Grâce à l'hydrogène atomique (HI), nous pouvons dresser la carte radioélectrique non seulement de la Voie lactée mais également de toutes les galaxies. Parmi les galaxies spirales observées en lumière visible, un tiers d'entre elles épousent le profil radioélectrique, pour citer parmi les plus connues M31, M51 et M81. Etant donné que le milieu est très peu excité, le courant neutre provient avant tout des collisions entre atomes. C'est ainsi qu'en analysant la raie à 21 cm les radioastronomes peuvent découvrir la structure spirale d'une galaxie irrégulière par exemple ou découvrir que les bras des galaxies spirales sont un véritable piège pour le gaz froid. En revanche la force du vent interstellaire qui souffle dans une galaxie elliptique ne permet en général pas d'y déceler des masses de gaz neutre. Ces galaxies abriteront donc moins d'étoiles de deuxième ou troisième génération que les galaxies spirales. Les seuls elliptiques ayant des régions HI sont d'ordinaire associées à un compagnon spiralé.



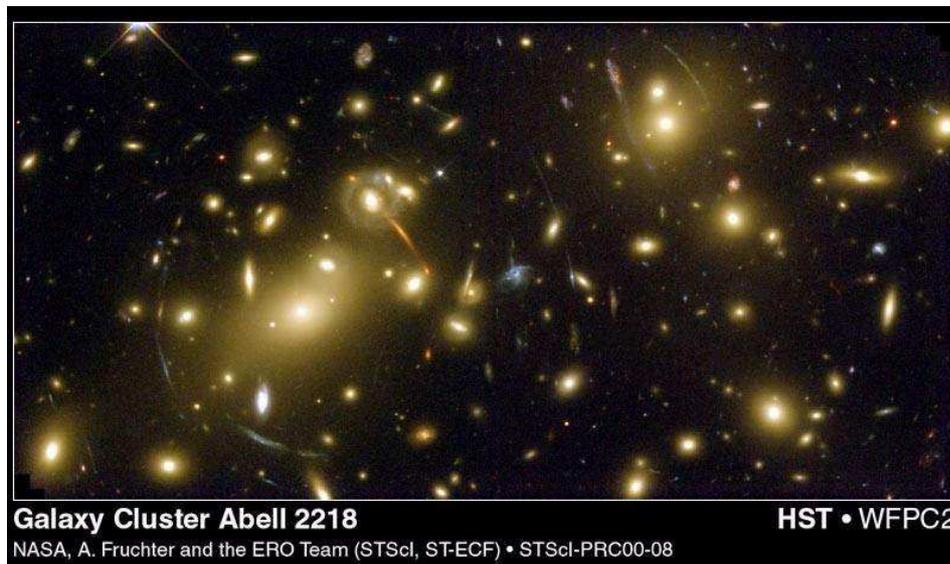
La structure de l'univers : les amas de galaxies

Observer des galaxies proches l'une de l'autre ou les comptabiliser sur une photographie ne suffit pas pour affirmer qu'elles appartiennent au même amas. Il faut encore vérifier qu'elles sont à la même distance. Hubble nous a appris qu'en raison de l'expansion de l'Univers, la distance et la vitesse d'éloignement des galaxies sont proportionnelles. En

déterminant le décalage vers le rouge des raies visibles dans leur spectre, on peut donc calculer leur vitesse de récession et donc estimer leur distance.

C'est ainsi que l'on a découvert que la Voie Lactée s'entoure d'une quarantaine de galaxies naines, formant ce qu'il est convenu d'appeler le groupe Local ou l'amas Local. Sa taille est d'environ un million d'années-lumière, grosso modo dix fois le diamètre de la Voie Lactée. Dans ce groupe maintenu par la gravité deux membres sont particulièrement brillants : la galaxie d'Andromède M31 et notre Galaxie.

Comme on peut s'en rendre compte en observant le ciel en détail, les galaxies ne sont pas isolées dans l'espace. Elles se rassemblent pour former des amas, les plus proches regroupant quelques centaines d'entités. En 1958 George Abell de Caltech recensa 2712 amas sur les plaques photographiques du Palomar Observatory Sky Survey (POSS) qui couvraient 30206 degrés carrés !



La photographie et l'étude spectrale permirent de confirmer l'existence de nombreux amas à moins de 400 millions d'années-lumière : les amas de la Couronne Boréale, de Coma, d'Hercule, de Persée, du Lion, de l'Hydre, de la Coupe, du Paon, des Voiles, etc. Dans ces amas, les galaxies vont souvent par paires et forment des couples physiques dont la séparation angulaire est inférieure au degré. 97 paires sont ainsi accessibles jusqu'à la magnitude 13. Quelquefois les galaxies peuvent être très étendues relativement aux distances qui les séparent: Abell, Fornax et Virgo comptent parmi les amas les plus vastes. Ils s'étendent en moyenne sur 30 millions d'années-lumière.

En général ces amas rassemblent plus de 200 galaxies distantes les unes des autres d'environ 500000 années-lumière. Plusieurs amas, dont Coma et celui de la Couronne Boréale comptent plusieurs milliers de galaxies (36000 et 76000 respectivement). Leur masse équivaut à environ 2 millions de milliards (2×10^{15}) de masses solaires ou 20000 fois la Voie Lactée ! Bien sûr il reste de petits amas lointains tel le Quintet de Stephan (5 galaxies), le Sextet de Seyfert (6 galaxies), le Triplet de Zwicky (3 galaxies), etc. Le plus éloigné est l'amas MS1054-03 (voir photographie ci-dessous) découvert par Pieter van Dokkum et Marijn Franx de l'Université de Groningen/Leiden aux Pays-Bas grâce au télescope Hubble en 1999. Il contient 81 galaxies et se situe à 8 milliards d'années-lumière !

Soumis à l'emprise de la gravitation dont les effets se ressentent principalement à grandes distances, ces amas de galaxies se regroupent en "superamas", chacun ne comprenant que 4

ou 5 amas. Ces superamas regroupent toutefois des centaines et des milliers de galaxies : Hydra, Centaurus, Virgo, etc.

En 1960, Gérard de Vaucouleurs découvrit que l'Amas Local, entouré d'une vingtaine de petits amas et d'une trentaine de galaxies isolées appartenait ainsi au "Superamas de la Vierge". Il forme le "Superamas Local" et s'étend sur environ 25 millions d'années-lumière. L'Amas Local semble être un membre périphérique de cette structure gigantesque dont le centre se situe à 600 millions d'années-lumière de la Voie Lactée.

Comment expliquer l'évolution des galaxies et le fait que certaines d'entre elles émettent une puissance énergie ? On sait aujourd'hui que les différentes morphologies de galaxies correspondent à différentes évolutions. La clé de cette histoire repose sur l'homogénéité primordiale de l'Univers et sur l'influence plus ou moins forte de la matière et de l'énergie sombres (modèles HDM et Λ CDM) sur laquelle nous reviendrons en cosmologie.

Grâce aux analyses méticuleuses des données du satellite COBE effectués par le groupe du Dr Smoot du Laboratoire National Lawrence Berkeley (LBL) et en particulier des mesures effectuées par le radiomètre micro-onde différentiel (DMR) sensible à la polarisation linéaire, nous disposons aujourd'hui de cartes des premiers milliers et millions d'années d'existence de l'univers.

Ces cartes en fausses couleurs nous expliquent comment les galaxies se sont formées. En plaçant ces différentes cartes en séquence chronologique, on constate que des fluctuations dans la densité de matière originale ont été amplifiées par l'attraction gravitationnelle, au point de freiner localement l'expansion de l'univers. Au bout de quelques millions d'années, la matière s'est trouvée en équilibre dans d'immenses halos plus ou moins sphériques d'un diamètre s'échelonnant entre quelques milliers et plusieurs millions d'années-lumière. Ces halos contenaient un plasma à haute température (10^7 K) qui, en se refroidissant, réagit avec les particules chargées, induisant une importante émission de rayonnements X. Entraînée par la rotation du halo, la matière fut attirée vers les régions centrales et se mit en orbite dans son plan. D'immenses disques se formèrent alors au centre des halos. On pense qu'en leur centre se développèrent de gigantesques trous noirs qui pourraient expliquer la source d'énergie des actuels quasars. Ces disques tournant sur eux-mêmes, la matière alentour se rassembla et forma des bras spiraux constitués d'immenses nuages de gaz. Traversés par les ondes de choc, ces nuages donnèrent naissance aux premières étoiles. Selon la fréquence de ces formations naquirent les galaxies spirales de différents types.

Les galaxies contenant beaucoup de régions HII actives formèrent beaucoup d'étoiles très lumineuses et consommèrent rapidement tous leurs gaz. Elles présentent aujourd'hui une population de vieilles étoiles à laquelle se mêle de grandes quantités de poussière, leur donnant une coloration rougeâtre. A l'inverse, les petites galaxies irrégulières n'ont pas eu la masse suffisante pour développer des bras spiraux. Les étoiles naissent et meurent en désarticulant continuellement les champs gravitationnels.

Quant aux elliptiques géantes, elles constituent souvent la galaxie la plus brillante des amas extragalactiques. On a d'abord cru qu'elles avaient une structure et une dynamique similaires à celles des étoiles. Mais elles tournent sur elles-mêmes beaucoup plus lentement qu'un corps fluide, et leur dynamique apparaît vraisemblablement liée à un équilibre triaxial (d'où leur forme ellipsoïdale). Des simulations indiqueraient que ces galaxies qui présentent pour la plupart une forte concentration centrale se sont peut-être formées suite à l'interaction de galaxies spirales qui se sont relaxées au terme d'un mouvement graduellement amorti. Ces interactions ont transformé la plus grande partie du gaz sous forme d'étoiles.

Enfin, les galaxies naines qui contiennent de nombreuses étoiles bleues sont peut-être les résidus de galaxies peu structurées qui ont été disloquées par l'explosion des étoiles de la première génération. La plupart d'entre elles sont relativement jeunes, distances de quelques milliards d'années-lumière tout au plus.

Grâce au projet SDSS, Sloan Digital Sky Survey qui consiste à établir un relevé complet de 100 millions d'objets célestes, des étoiles et des galaxies du ciel boréal jusqu'à la 23^{ème} magnitude et couplé aux données infrarouges du programme DENIS de l'ESO, nous connaissons bientôt la distance d'un million de galaxies et de 100000 quasars ce qui permettra, du moins on l'espère, d'estimer la courbure de l'univers. Ce jour là nous entreverrons peut-être l'horizon cosmologique.

Selon la fréquence des formations naquirent les galaxies spirales de différents types.

Les galaxies contenant beaucoup de régions HII actives formèrent beaucoup d'étoiles très lumineuses et consommèrent rapidement tous leurs gaz. Elles présentent aujourd'hui une population de vieilles étoiles à laquelle se mêle de grandes quantités de poussière, leur donnant une coloration rougeâtre. A l'inverse, les petites galaxies irrégulières n'ont pas eu la masse suffisante pour développer des bras spiraux. Les étoiles naissent et meurent en désarticulant continuellement les champs gravitationnels.

Quant aux elliptiques géantes, elles constituent souvent la galaxie la plus brillante des amas extragalactiques. On a d'abord cru qu'elles avaient une structure et une dynamique similaires à celles des étoiles. Mais elles tournent sur elles-mêmes beaucoup plus lentement qu'un corps fluide, et leur dynamique apparaît vraisemblablement liée à un équilibre triaxial (d'où leur forme ellipsoïdale). Des simulations indiqueraient que ces galaxies qui présentent pour la plupart une forte concentration centrale se sont peut-être formées suite à l'interaction de galaxies spirales qui se sont relaxées au terme d'un mouvement graduellement amorti. Ces interactions ont transformé la plus grande partie du gaz sous forme d'étoiles.

Enfin, les galaxies naines qui contiennent de nombreuses étoiles bleues sont peut-être les résidus de galaxies peu structurées qui ont été disloquées par l'explosion des étoiles de la première génération. La plupart d'entre elles sont relativement jeunes, distances de quelques milliards d'années-lumière tout au plus.

Grâce au projet SDSS, Sloan Digital Sky Survey qui consiste à établir un relevé complet de 100 millions d'objets célestes, des étoiles et des galaxies du ciel boréal jusqu'à la 23^{ème} magnitude et couplé aux données infrarouges du programme DENIS de l'ESO, nous connaissons bientôt la distance d'un million de galaxies et de 100000 quasars ce qui permettra, du moins on l'espère, d'estimer la courbure de l'univers. Ce jour là nous entreverrons peut-être l'horizon cosmologique.

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.

