



PONTIFICIA
ACADEMIA
SCIENTIARVM

COMMENTARII

Vol. III

N. 20

BENGT STRÖMGREN

L'EVOLUTION DES GALAXIES DANS L'UNIVERS EN EXPANSION

EX AEDIBVS ACADEMICIS IN CIVITATE VATICANA



PONTIFICIA
ACADEMIA
SCIENTIARVM

COMMENTARII

Vol. III - N. 20

pag. 1 - 28

L'EVOLUTION DES GALAXIES DANS L'UNIVERS EN EXPANSION

BENGT STRÖMGREN

Académicien Pontifical

Au dix-neuvième siècle, un problème capital en Astronomie était le calcul, avec une haute précision des mouvements des corps du système solaire, d'après la mécanique de Newton. Cependant l'exploration du système d'étoiles dont notre soleil fait part avait commencé; la connaissance de la localisation dans l'espace et du mouvement spatial des étoiles les plus proches progressait.

Au cours des dix dernières années du dix-neuvième siècle et pendant les premières décades du vingtième, on assista à un développement remarquable de la recherche en astronomie.

La structure et la dynamique de notre Galaxie devinrent l'objet d'études intensives, et les problèmes concernant l'astrophysique et la constitution interne du soleil et des étoiles furent soumis à une investigation fondée sur la physique atomique.

Dans les années 1920, il fut établi que, ce que l'on appelait nébuleuses spirales et nébuleuses elliptiques sont de gigantesques systèmes stellaires, des galaxies externes analogues à notre propre Galaxie. Suivirent des recherches sur les distances

et les vitesses radiales des galaxies, qui montrèrent qu'elles s'éloignent de l'observateur, et que le rapport entre leur distance à l'observateur et leur vitesse radiale est une constante universelle.

C'est là l'expression de la loi de Hubble, et à la suite d'un effort d'observation et de compilation considérable, on a pu assigner à la constante de proportionnalité la valeur de 70 kilomètres par seconde par megaparsec avec une incertitude de l'ordre de $\pm 20 \text{ km sec}^{-1} \text{ megaparsec}^{-1}$ (1 parsec = $3.3 \text{ années lumière} = 3.10^{18} \text{ cm}$). La dispersion des mesures autour des valeurs fournies par la relation de Hubble est faible, et pour les galaxies distantes de 100 megaparsecs et plus, le mouvement radial est entièrement dominé par le "flux de Hubble".

On se rendit immédiatement compte que si les galaxies s'éloignaient de l'observateur suivant la loi de Hubble cela impliquerait une expansion globale de la partie observée de l'Univers. En effet, quelle que soit la galaxie sur laquelle l'observateur serait placé, il observerait le même phénomène d'éloignement des autres galaxies à des vitesses proportionnelles à leur distance de "sa" galaxie. L'existence du flux de Hubble signifie que la distance entre deux galaxies quelconques de notre Univers ne peut qu'augmenter avec le temps. Ce phénomène est connu sous le nom d'"Expansion de l'Univers".

Les vitesses radiales des galaxies sont déterminées à partir de mesures de la longueur d'ondes des raies du spectre. L'observation révèle un décalage vers le rouge; une augmentation de longueur d'onde des raies spectrales, relative aux valeurs du laboratoire, augmentations interprétées comme un effet Doppler, causé par l'éloignement de la source lumineuse dans la direction radiale. Le fondement de la loi de Hubble est la proportionnalité entre le décalage vers le rouge et la distance à la galaxie observée. Cette proportionnalité est maintenant bien établie pour les galaxies situées

à des distances inférieures à un peu plus de 1 milliard de parsec, soit 3 milliards d'années lumière.

Les galaxies les plus proches de la nôtre sont les Nébuleuses de Magellan, situées environ à 60.000 parsecs, alors que la Nébuleuse d'Andromède, une galaxie assez semblable à la nôtre, se trouve à une distance d'environ 700.000 parsecs. Dans un rayon de 100 millions de parsecs, il y a plus d'un million de galaxies. Avec les techniques d'observation actuelles, nous avons en principe accès à plus d'un milliard de galaxies. Le phénomène appelé "Expansion de l'Univers" signifie, comme nous l'avons indiqué, que toutes les distances entre les galaxies augmentent avec le temps. En un milliard d'années l'augmentation est de 7 pour cent. D'autre part, si nous revenons en arrière dans le temps, toutes ces distances diminuent. Par exemple, il y a un milliard d'années, toutes les distances entre les galaxies étaient 7 pour cent plus petites qu'actuellement.

Les astronomes peuvent répondre avec certitude aux questions concernant les changements de distances entre galaxies lorsqu'il s'agit de regarder 1 milliard d'années en arrière. Toutefois, si la question se pose d'étudier les changements survenus au cours de plusieurs milliards d'années, nous avons besoin de renseignements plus précis que ceux que nous apporte la loi de Hubble, laquelle décrit les mouvements à partir d'observations faites à l'époque actuelle. Il nous faut alors des informations, non seulement sur les vitesses actuelles, mais aussi sur l'accélération ou le ralentissement des mouvements relatifs des galaxies.

Essayer de suivre les changements dans la multitude des galaxies en reculant de plusieurs milliards d'années dans le temps — quel défi pour le scientifique! Je vais essayer de décrire les efforts accomplis et les résultats obtenus, élargissant mon sujet pour y inclure aussi les investigations sur les changements dans le temps, non seulement des distances entre galaxies, mais aussi des galaxies elles-mêmes et de leurs cons-

tituants, les étoiles. Pour cela je vais procéder en trois étapes: D'abord je résumerai brièvement les résultats en ce qui concerne: 1) la structure actuelle des galaxies et de leurs constituants, les étoiles et la matière interstellaire. 2) Les changements des galaxies et de leurs constituants au cours du temps, tels qu'on peut les déduire d'une analyse des structures actuelles basée sur les lois physiques qui les régissent.

Ensuite, je décrirai en gros un modèle de l'Univers et de ses changements lorsque l'on recule dans le temps — modèle qui a été conçu au cours de ces dernières décennies à l'aide des informations décrites dans la première étape.

Finalement, je vais essayer, dans la troisième étape, de donner une description quelque peu détaillée de l'évolution des galaxies et de leurs constituants dans l'Univers en Expansion, du passé lointain à nos jours, dans le cadre du modèle décrit dans la seconde étape.

Notre Galaxie est un système composé de plusieurs centaines de milliards d'étoiles. Le noyau de ce système est situé à une distance d'environ 8.000 parsecs du soleil, dans la direction de la constellation du Sagittaire dans l'Hémisphère Sud. Pris dans une sphère autour du centre de la Galaxie, et dans un rayon de 2.000 parsecs, le nombre d'étoiles par unité de volume, leur densité dans l'espace, est considérablement plus élevé que dans le voisinage du soleil. Cette zone est appelée bulbe central de la Galaxie. Dans le bulbe, la densité spatiale des étoiles augmente rapidement vers le centre, de sorte que dans une sphère autour du centre et de rayon égal à 10 parsecs, la densité stellaire devient plus de 10.000 fois supérieure à celle existant dans un volume équivalent autour du soleil. La direction du centre de notre Galaxie a été déterminée avec un degré de précision élevé à partir de l'observation des ondes radio émises par la masse centrale. La contrepartie en lumière visible est indétectable par suite de la forte absorption de la lumière le long de son trajet vers l'observateur.

Le bulbe central de la Galaxie est entouré d'étoiles ré-

pandues dans un espace en forme de disque plat (ou de lentille), dont le plan central passerait à travers le noyau mentionné ci-dessus. Le disque (ou lentille), a un rayon de l'ordre de 15.000 parsecs environ, tandis que son épaisseur est d'environ 1.000 parsecs. La répartition des étoiles à l'intérieur du disque est à peu près symétrique autour d'un axe qui traverserait son centre perpendiculairement, mais il y a des déviations de la symétrie axiale, dans le sens que l'on y observe des zones de densité plus élevée en forme de spirales.

Le bulbe central est entouré d'étoiles réparties dans un volume presque sphérique appelé le halo. Dans le halo le nombre d'étoiles mesuré par unité de volume est beaucoup plus faible que dans la masse centrale ou dans le disque. Le rayon du halo mesure environ 15.000 parsecs.

Le soleil est situé dans le disque, près de son plan équatorial et, comme nous l'avons déjà dit, il se trouve à environ 8.000 parsecs du centre galactique. Des lignes de visée du soleil dans une direction parallèle au plan central du disque, passent à travers le disque sur des distances de près de 10.000 à plus de 20.000 parsecs, tandis que des lignes de visée perpendiculaires au disque traversent d'abord plusieurs centaines de parsecs de la masse du disque, puis passent à travers plusieurs milliers de parsecs de halo très raréfié.

Les étoiles du disque prennent toutes part à un même mouvement de rotation autour du centre de la galaxie. Chaque étoile du disque se meut sur une orbite presque circulaire autour du centre. La période de l'orbite dépend de la distance moyenne au centre.

Pour notre soleil elle est proche de 200 millions d'années, ce qui veut dire que sa vitesse orbitale est proche de 250 kilomètres par seconde.

Les étoiles du bulbe central sont en rotation autour du centre, dans le même sens que les étoiles du disque, mais l'ensemble de leurs mouvements est plus compliqué.

Les étoiles du halo, enfin, tournent dans la même direction que celles du disque, mais leur vitesse de rotation est

beaucoup plus faible, et pour beaucoup d'entre elles approche de zéro.

Le disque contient des centaines de milliards d'étoiles qui ressemblent beaucoup au soleil, puisqu'elles sont des corps en équilibre presque sphériques, ayant des températures de surface de quelques milliers de degrés et des températures au centre de l'ordre de dix à cent millions de degrés. Comme le soleil, l'immense majorité des étoiles, dans leur zone centrale, convertissent l'énergie nucléaire en énergie thermique qui passe à travers la masse de l'étoile et est émise sous forme de rayonnement dans l'espace.

La composition chimique du soleil est dominée par l'hydrogène et l'hélium. L'hydrogène forme plus de 70 pour cent, de sa masse, l'hélium un peu moins de 30 pour cent, tandis que les autres éléments réunis ne constituent que 2 pour cent environ de la masse totale. Les régions centrales du soleil consistent cependant en moins de 40 pour cent d'hydrogène, et environ 60 pour cent d'hélium, avec, de nouveau, encore 2 pour cent d'éléments plus lourds; la raison en est qu'environ la moitié de l'hydrogène "présent" à l'origine dans les régions centrales, a été transformé en hélium par des processus thermonucléaires au cours de l'existence du soleil, pendant 4,5 milliards d'années environ.

La plupart des étoiles du disque ont une composition chimique semblable à celle du soleil. Elles peuvent différer du soleil en ce qui se rapporte à leur masse ou à leur âge. Les masses varient dans des proportions de 0.02 à 60 masses solaires, tandis que les âges vont de moins d'un million d'années à un maximum d'environ dix milliards d'années.

Une étoile de masse solaire passe, au long de son existence, par une évolution qui va de la phase de "proto-étoile" caractérisée par une densité extrêmement faible et un rayon très étendu, à celle connue sous le nom de "Naine Blanche", caractérisée par une très forte densité et un rayon de l'ordre de celui de la terre. La première partie de son évolution se distingue par une contraction rapide, et en beaucoup moins

d'un milliard d'années, elle atteint une configuration d'équilibre très semblable à celle du soleil actuel. Durant la période que l'étoile passe dans ce qu'on appelle la série principale, l'énergie qu'elle rayonne dans l'espace, est exactement compensée par l'énergie nucléaire qui résulte de la conversion de l'hydrogène en hélium. Après un intervalle de temps un peu inférieur à dix milliards d'années, l'étoile sort de la série principale, parce que tout l'hydrogène contenu à l'intérieur qui était suffisamment chaud pour être converti en hélium par fusion thermonucléaire est épuisé. Alors suit une phase d'évolution, appelée la phase d'"étoile géante", pendant laquelle la structure de l'étoile change radicalement. Les parties externes de l'étoile se dilatent tandis que les parties centrales se contractent. C'est pourquoi une étoile géante a un diamètre plusieurs fois celui du soleil.

En même temps, la densité du noyau et la température au centre sont beaucoup plus élevées que celles du soleil. Par suite du changement de structure, l'hydrogène en dehors du noyau stellaire, est maintenant porté à une température suffisante pour permettre sa conversion thermonucléaire en hélium. A mesure que l'évolution avance, l'hélium dans le noyau deviendra assez chaud pour que la conversion thermonucléaire de cet hélium en carbone ait lieu. Ainsi sont engendrées de nouvelles sources d'énergie nucléaire, et l'énergie ainsi générée compense le rayonnement émis par l'étoile géante qui est maintenant beaucoup plus intense qu'il ne l'était pendant la phase principale. Parce que la luminosité de l'étoile géante est plus grande, les nouvelles sources d'énergie ne dureront qu'une période de temps beaucoup plus courte que celle de la phase principale.

Le stage suivant de l'évolution d'une étoile de masse solaire est compliqué, mais il a été largement clarifié par la combinaison du travail de calcul théorique et de l'observation. Dans la situation actuelle, les résultats les plus importants de ces études sont les suivants: dans sa phase d'étoile géante, l'étoile

perd une partie considérable de sa masse dans l'espace environnant, sous forme de matière qui s'en sépare à des vitesses de l'ordre de dix kilomètres par seconde. A la fin de la phase d'étoile géante une enveloppe extérieure se sépare de la partie centrale de l'étoile par expansion.

Cet "objet" a l'aspect d'une nébuleuse planétaire avec une étoile au centre. L'étoile centrale se contracte, et dans un temps relativement très court, devient une "naine blanche" très dense à luminosité très faible. La masse de la naine blanche est typiquement de l'ordre de la moitié de la masse solaire, si cette dernière était prise comme masse initiale de l'étoile considérée. Une conséquence très importante est qu'une bonne partie de la masse de l'étoile retourne à l'espace environnant. La composition chimique de cette partie est pratiquement inchangée. Les atomes des éléments plus lourds qui ont été formés à partir de l'hydrogène et de l'hélium à l'intérieur de l'étoile, sont presque tous emprisonnés dans le produit final de l'évolution, la "naine blanche". Pour les étoiles du disque dont les masses sont plus petites que celles du soleil, l'évolution est similaire, mais lorsque la masse est inférieure à environ 70 pour cent de la masse solaire, la luminosité de l'étoile pendant la période principale est considérablement plus faible que celle du soleil, et par suite, la combustion de l'hydrogène durera plus longtemps. L'observation montre que de telles étoiles de petite masse se trouvent encore dans la phase principale de leur existence. En revanche, pour les étoiles du disque de masse plus grande que celle du soleil, les luminosités sont plus intenses et l'évolution dans la phase principale est plus rapide. Pour une étoile du disque ayant une masse équivalente à dix masses solaires, par exemple, le temps passé dans la série principale est légèrement inférieur à vingt millions d'années.

Les étoiles du disque dont les masses vont de une à quatre masses solaires, ont une évolution semblable à celle que nous avons décrite pour les étoiles de masse solaire.

Une phase de contraction rapide est suivie d'une phase de série principale beaucoup plus longue. Cette dernière est à nouveau suivie d'une phase "géante", pendant laquelle se produit une perte de masse très importante. Le stade final de l'évolution est de nouveau une "naine blanche", toujours avec une masse inférieure à la limite dite de Chandrasekhar qui équivaut à 1.4 masse solaire et au delà de laquelle la configuration de naine blanche devient instable.

Les étoiles du disque d'une masse entre 4 et 9 masses solaires, évoluent d'une façon qui diffère sur des points importants. Tandis que leur évolution, pendant la phase passée dans la série principale est semblable à celle des étoiles de masse solaire, à part qu'elle est beaucoup plus rapide à cause de la très grande luminosité des étoiles à grande masse, leur structure interne au stade d'Etoile Géante, et particulièrement vers la fin de ce stade, est notablement différente. Dans le noyau central de l'étoile, la densité devient extrêmement forte, dépassant un milliard de grammes par centimètre cube, et la température approche d'un milliard de degrés. Dans ces circonstances, les noyaux d'atomes de carbone, formés précédemment par l'évolution de noyaux d'hélium, réagissent l'un avec l'autre, et il en résulte des éléments encore plus lourds. Le problème de suivre, par des calculs théoriques, le développement devenue très rapide dans le noyau stellaire, est très difficile à résoudre, et on n'a pas encore obtenu des réponses définitives. Cependant, en combinant les résultats théoriques et les données de l'observation, on a pu brosser le tableau suivant: la contraction du noyau provoque une violente "implosion" qui fait exploser les parties externes de l'étoile vers l'espace environnant. Autrement dit, l'étoile se divise en une étoile centrale et une nébuleuse qui s'étend rapidement. Dans l'étoile centrale, la densité de matière atteint celle de la matière des noyaux atomiques. L'étoile toute entière est alors tellement comprimée que son rayon est réduit à environ dix kilomètres. Au cours des dernières phases de l'évolution de cette étoile géante, des éléments lourds se sont formés, allant du car-

bone et de l'oxygène, jusqu'au fer et au nickel. Finalement, toutefois, la majeure partie de l'intérieur de l'étoile centrale résultante, atteint des densités si élevées, que la neutronisation (capture d'électrons négatifs par des protons positifs à l'intérieur des noyaux), se produit, et aussi la photodissociation des éléments plus lourds. Il en résulte une matière consistant surtout en neutrons; ce genre d'étoile est appelé "étoile à neutrons". Les calculs théoriques montrent que les étoiles à neutrons peuvent avoir une configuration stable si leurs masses dépassent la limite de Chandrasekhar, c'est à dire, par exemple deux masses solaires.

Les étoiles à neutrons ont été découvertes par l'observation des ondes radio qu'elles émettent: celles-ci ont la particularité d'être pulsées à cause de la rotation rapide de ces astres à diamètre réduit. On les désigne sous le nom de pulsars. Un exemple frappant est celui de la Nébuleuse du Crabe, une nébuleuse qui s'étend rapidement et qui a une étoile centrale, un pulsar, dont la période de rotation est d'un trentième de seconde.

L'étoile à neutron en rotation possède un champ magnétique à la surface d'environ un million de gauss. Ce fait constitue la base des interprétations physiques des émissions d'ondes radio par pulsation. Cette étoile apparaît sur les photographies du ciel, et elle émet aussi des pulsations dans la partie optique du spectre. On a également enregistré une émission pulsée dans le domaine des rayons X.

En 1054, apparut dans le ciel, à l'emplacement où l'on observe de nos jours la nébuleuse du Crabe avec son pulsar central, une très brillante "supernova"; c'est à dire une étoile qui explosait violemment. Il est évident que tous ces renseignements, combinés avec le travail théorique dont nous venons de parler, nous fournissent une base pour comprendre ce qui se passe lors des dernières phases d'évolution des étoiles géantes de masses comprises entre quatre et neuf masses solaires. Actuellement, plus de 100 "pulsars" ont été découverts, et ce

matériel d'observation a été utilisé pour les études statistiques sur la fréquence de formation d'étoiles à neutrons. On a combiné ces résultats avec ceux sur la fréquence d'explosion des "supernovae", (de l'ordre de une tous les cinquante ans pour la Galaxie toute entière), et ceux-ci avec les renseignements tirés de l'observation confirment le tableau que nous venons de brosser de l'évolution des étoiles du disque.

Une conséquence importante de la description de l'évolution des étoiles du disque ayant des masses entre 4 et 9 masses solaires, est que presque tous les atomes des éléments lourds formés par synthèse à l'intérieur des étoiles, à partir de l'hydrogène et de l'hélium, se trouvent de nouveau enfermés dans le produit final du processus d'évolution, c'est à dire dans notre cas, dans l'étoile à neutrons.

Finalement, considérons les étoiles du disque dont les masses sont supérieures à 9 masses solaires. Les calculs théoriques montrent que pour ces étoiles de très grande masse, le tableau d'évolution est, sous bien des aspects, semblable à celui des étoiles de 4 à 9 masses solaires; en particulier, pour elles aussi, la phase géante prend fin avec l'explosion de l'étoile en une supernova. Cependant, dans un tel cas, l'étoile qui en résulte peut être soit une étoile à neutrons, soit une étoile encore plus petite et plus dense, appelée "trou noir", un genre d'étoile encore hypothétique. En tous cas, l'étoile résultante est suffisamment petite comparée à sa taille initiale pour qu'une partie très importante des atomes plus lourds synthétisés à partir de l'hydrogène et de l'hélium, soit disséminée dans l'espace environnant. Nous allons discuter les conséquences de cette conclusion importante.

L'ensemble des étoiles du disque, remplit un volume qui représente une très petite fraction seulement du volume du disque de la galaxie. Ainsi, la distance entre le soleil et l'étoile la plus proche, est plus de vingt millions de fois supérieure au diamètre du soleil, et ceci est une caractéristique du disque galactique. Cependant, l'espace entre les étoiles du disque n'est pas vide. Il contient une composante

galactique très importante, la matière interstellaire. A la suite de recherches commencées il y a environ soixante-dix ans, on sait aujourd'hui que la matière interstellaire consiste en un mélange de gaz et de minuscules particules solides. La densité moyenne de ce gaz est extrêmement faible. Pour la partie du disque galactique située près du soleil, elle est de l'ordre d'un atome par centimètre cube.

Le milieu des particules est plus ténu encore que le milieu gazeux, sa densité moyenne étant environ cent fois plus petite. La composition chimique de la matière interstellaire est semblable à celle des étoiles du disque. L'hydrogène y constitue de loin l'élément principal, vient ensuite l'hélium; les éléments plus lourds, ne forment qu'un petit pourcentage de la masse totale. L'hydrogène et l'hélium se trouvent surtout dans la phase gazeuse, tandis qu'une fraction considérable des éléments lourds se trouve contenue dans les particules interstellaires solides.

La masse totale de matière interstellaire dans le disque est notablement inférieure à la masse totale de toutes les étoiles du disque. Dans le voisinage du soleil elle approche des trois pour cent, et pour le disque tout entier elle est légèrement inférieure à dix pour cent.

La répartition de la matière interstellaire dans l'espace est très inégale. Plus de la moitié de la masse est concentrée en petits nuages d'un diamètre de l'ordre de dix parsecs qui, mis ensemble, ne forment qu'un petit pourcentage du volume total du disque. A l'intérieur d'un nuage, la densité est typiquement de dix à cent atomes par centimètre cube. Dans l'espace compris entre les nuages, la matière interstellaire est extrêmement ténue, avec des densités notablement inférieures à un atome par centimètre cube. La distribution dans l'espace est analogue pour les composantes gazeuses et solides de la matière interstellaire.

Une petite fraction de la matière interstellaire se concentre en nuages beaucoup plus denses, dont les densités dépassent dix mille atomes par centimètre cube. Dans quelques-uns de

ces nuages le gaz est ionisé par la radiation des étoiles chaudes avoisinantes. Alors on observe un spectre de raies d'émission en même temps qu'une émission d'ondes radio d'origine thermique. La nébuleuse d'Orion est un exemple bien connu de ce genre de nuage dense. D'autres nuages denses, non-ionisés et froids, sont détectés grâce à la forte absorption par leurs composantes de particules qui les fait apparaître sous forme de nuages obscurs. La composante gazeuse de ce nuage donne lieu à des raies d'absorption dans le spectre des objets situés derrière le nuage, raies qui peuvent être détectées aussi bien dans le spectre radio que dans le spectre optique, spécialement dans l'ultraviolet lointain, observé par satellites.

Nous arrivons maintenant à une partie de la description des propriétés du disque galactique qui est important dans la discussion de l'évolution de notre Galaxie, c'est à dire, l'interaction de la matière interstellaire et des étoiles.

Le fait, déjà mentionné, que dans le disque se trouvent de jeunes étoiles, formées au cours des cent derniers millions d'années, certaines même au cours des vingt derniers millions d'années, prouve l'occurrence de la formation d'étoiles à partir de la matière interstellaire aux propriétés telles qu'on les observe à l'époque actuelle. Ainsi a-t-il été possible de développer un tableau assez détaillé de la formation des étoiles, en joignant l'observation à la théorie.

Considérons un de ces nuages de matière interstellaire dont nous avons parlé tout à l'heure. Chaque élément de matière à l'intérieur du nuage, est soumis à une attraction vers le centre du nuage à cause des forces de gravitation, mais le mouvement thermique et turbulent à l'intérieur du nuage est dans ce cas, assez fort pour empêcher le nuage de se contracter vers son centre. Dans le cas des nuages denses froids, également mentionnés plus haut, la situation est différente. Ici la gravitation est assez forte pour que l'amas se contracte rapidement et devienne de plus en plus dense. On peut montrer par des calculs théoriques que pendant sa contraction le nuage se divisera en morceaux de plus en plus petits. Ce processus

continu de contraction et de fragmentation, conduira à la formation d'un certain nombre de corps séparés, les "proto-étoiles". Ce processus prend environ un million d'années. Les "proto-étoiles" deviendront des étoiles et passeront par une évolution plus lente, comme nous l'avons décrit précédemment de façon assez détaillée. Ainsi, à partir du nuage dense, se développe un groupe ou une association d'étoiles mais la force de gravité ne les attache l'une à l'autre que faiblement, et à la longue, d'autres forces de gravitation provenant d'autres parties du disque feront que la plupart des étoiles nouvellement formées seront dispersées à travers le disque galactique; elles deviennent ainsi des étoiles de champ.

S'il ne se formait pas de nouveaux nuages denses et froids dans le disque galactique, la formation d'étoiles prendrait rapidement fin. Cependant, un processus d'aggrégation des nuages plus petits, c'est à dire de condensation de matière interstellaire en nuages froids et denses prend place continuellement dans le disque. Ces dernières années on est arrivé à comprendre assez bien comment cela se fait. La formation d'amas froids et denses a lieu surtout dans la structure des bras en spirale qui sont une caractéristique de l'aspect du disque.

Les bras en spirale sont des régions plus denses en étoiles et en matière interstellaire que celles comprises entre eux, mais la différence de densité n'est pas très marquée, puisqu'elle atteint normalement moins de 10 pour cent. Cependant, les plus jeunes étoiles du disque se concentrent fortement dans les bras en spirale, et ceci indique qu'ils sont les zones de condensations de nuages froids et denses, et de formation d'étoiles. Les calculs théoriques sur le flux de matière interstellaire à travers le champ de gravitation des bras en spirale nous suggère que la condensation de nuages denses et froids y prend place.

Ainsi de nos jours nous sommes en train d'observer une gigantesque machine en marche. La matière interstellaire ténue se condense en étoiles dont les masses varient entre une petite fraction de la masse solaire et plusieurs mas-

ses solaires. Comme nous l'avons vu, les petites masses évoluent très lentement, l'ancienne matière interstellaire est emprisonnée dans des étoiles de petite masse depuis une très longue période, plus longue que le temps écoulé depuis que notre Galaxie existe. Les masses plus grandes traversent une évolution qui aboutit à la formation de résidus stellaires à très longue vie, les naines blanches et les étoiles à neutrons, tandis qu'une partie importante de la masse retourne à l'espace interstellaire, essentiellement inchangée chimiquement, et se mélange alors à la matière interstellaire existante.

Seules les étoiles les plus massives engendrent à la fin de leur évolution, une matière qui est plus riche en éléments lourds que leur matière interstellaire originale. Ce que nous avons appelé la gigantesque machine, provoque ainsi deux changements majeurs au cours de l'évolution. Elle convertit graduellement la matière interstellaire du disque en étoiles de petite masse, naines blanches et étoiles à neutrons, et graduellement aussi elle enrichit la matière interstellaire avec des éléments plus lourds que l'hydrogène et l'hélium. Le rendement de ladite machine en ce qui concerne cet enrichissement pourrait être qualifié d'assez faible. En effet, seul un petit pourcentage de la totalité de la matière interstellaire soumise à ce traitement, est convertie en éléments lourds dû au fait que seules les étoiles les plus massives fournissent une contribution notable.

Et la machine gigantesque a produit tout ce monde des étoiles du disque: des étoiles très volumineuses, très brillantes, qui vivent moins de 30 millions d'années et pour cela peuplent encore les régions des bras en spirale où elles sont nées, et aussi toute une série de masses plus petites, qui vivent des milliards d'années et qui ont depuis longtemps émigré en dehors des régions du bras en spirale pour aller peupler de façon homogène tout le disque.

Nous avons considéré de façon détaillée, les propriétés du disque de notre Galaxie, et maintenant nous allons

tourner notre attention vers la région centrale, appelée bulbe central.

Les parties extérieures du bulbe central contiennent peu de matière interstellaire, et aucune formation d'étoiles n'y prend place à l'époque actuelle. La population stellaire consiste en étoiles de petites masses et de longue vie. Une portion considérable de ces étoiles possèdent des propriétés chimiques analogues à celles que nous avons trouvées pour le soleil et les étoiles du disque, mais pour beaucoup d'entre elles la composition chimique est notablement différente: alors que le contenu relatif d'hydrogène et d'hélium est à peu près le même, celui des éléments lourds est beaucoup plus bas.

Près du centre du bulbe on trouve à nouveau une très haute densité de matière interstellaire. En effet, la quantité de particules est si grande que l'absorption de radiations optiques est très forte. La plupart des renseignements sur cette région nous vient de l'observation dans le domaine de fréquence des ondes radio, et c'est en s'appuyant sur ces renseignements qu'on est arrivé à conclure que la densité moyenne de la matière qui se trouve très proche du centre de notre Galaxie est très élevée.

Le halo presque sphérique de notre Galaxie renferme une population d'étoiles sensiblement différentes de celles du disque. Leur composition chimique est entièrement dominée par l'hydrogène et l'hélium, le contenu relatif en éléments lourds étant inférieur de deux ordres de grandeur à ce qu'il est pour les étoiles du disque, souvent plus petit qu'un centième de pour cent. La densité de la matière interstellaire dans le halo est extrêmement faible, environ mille fois plus basse que dans le disque, et on n'a pas de preuve de formation d'étoiles dans le halo à l'époque actuelle.

De ce fait, les calculs sur l'âge des étoiles du halo nous montrent que ce sont de vieilles étoiles, les plus vieilles de notre Galaxie. Leurs âges dépassent légèrement dix milliards d'années. On n'a pas observé d'étoiles de grande masse dans la population du halo. Une importante caractéristique du halo

est la présence d'amas globulaires, systèmes qui contiennent environ un million d'étoiles du genre "halo" dans des espaces presque sphériques dont le rayon est de l'ordre de 10 parsecs. Pris dans leur totalité, ces amas globulaires comprennent environ 1/100 des étoiles du halo.

En rassemblant toutes les informations que nous avons sur le disque, le noyau central et le halo, on peut former le tableau de l'évolution dynamique et chimique de notre Galaxie.

L'âge de notre Galaxie en tant que système isolé, doit être d'un peu plus de 10 milliards d'années. Au début elle était formée entièrement de matière gazeuse très ténue, un mélange d'hydrogène et d'hélium, remplissant ce qui est aujourd'hui le volume presque sphérique du halo galactique. Tout le système doit avoir été doué d'un moment angulaire.

La répartition des densités devait être assez inégale, et il devait y avoir des régions gazeuses, des nuages, de densité beaucoup plus élevée que la densité moyenne du tout. Dans ces nuages commença la formation d'étoiles, les nuages les plus denses donnant naissance aux étoiles groupées en amas globulaires, d'autres nuages engendrant les étoiles qui sont devenues la population du halo actuel.

Les mouvements au sein du système gazeux ont dû être de type turbulent, mais avec une énergie cinétique totale suffisamment basse pour que la gravitation de Newton ait le dessus. Ce qui signifie que la majeure partie du gaz a dû converger rapidement vers le centre du système. A cette période primitive a dû avoir lieu une compétition entre la formation stellaire et l'afflux des matières stellaires gazeuses vers le centre. Le résultat de cette compétition a déterminé la distribution dans l'espace des étoiles du halo, et le rapport des masses entre le halo et le bulbe central. Pour les étoiles nouvellement formées et les petits nuages denses de matière interstellaire, le mouvement se sera produit sans dissipation. Pour les plus grands nuages, cependant, les collisions entre nuages auront profondément affecté les trajectoires. Il a dû s'ensuivre une

forte concentration de matière gazeuse dans la région du bulbe central, et à un âge du système probablement inférieur à un milliard d'années, prit place dans le bulbe central la plus grande activité de conversion de la matière interstellaire en étoiles. Des milliards d'étoiles furent formées, et un petit nombre d'entre elles parcoururent rapidement les étapes de leur évolution. Ainsi se mit en marche la puissante machine productrice d'éléments plus lourds et graduellement de nouvelles générations d'étoiles, dont la composition chimique est analogue à celle du soleil, furent formées.

La conversion de la matière interstellaire dans le bulbe central en étoiles, continua probablement jusqu'à l'épuisement presque total de la matière interstellaire qui s'y trouvait. Celle que l'on observe actuellement tout près du centre de la Galaxie, est sans doute venue en grande partie du gaz échappé d'étoiles en évolution et fut attiré vers le centre par la gravitation Newtonienne.

J'ai fait mention de la compétition entre la formation des étoiles et l'afflux de matière gazeuse vers le centre. Dans notre Galaxie il doit s'être produit un ralentissement progressif de la formation d'étoiles dans la matière qui se trouvait encore en dehors du bulbe central. Une quantité notable de matière gazeuse a ainsi subsisté, et les collisions entre les nuages gazeux en dehors de l'espace occupé par le bulbe, provoquèrent une diminution de la turbulence, par suite de quoi, l'effet de la rotation l'emporta. Le résultat fut la formation d'un disque plat, en rotation, disque en grande partie gazeux en dehors du bulbe central. Pendant les quelques milliards d'années qui suivirent, la formation d'étoiles prit place dans le disque à une allure lente, mais cependant assez rapide pour permettre, au cours d'environ dix milliards d'années, la formation du disque actuel, consistant surtout en étoiles avec un résidu de quelques pour cent de matière interstellaire. Laissons-là maintenant notre Galaxie et envisageons les systèmes stellaires en dehors du nôtre: les autres galaxies.

La partie de l'Univers explorée jusqu'à nos jours, est contenue dans une énorme sphère dont le rayon dépasse un milliard de parsecs. Nous trouvons dans cet espace des systèmes stellaires variés: des galaxies spirales semblables à la nôtre, des spirales barrées, des galaxies elliptiques plus au moins aplaties, et des galaxies irrégulières comme les nuages de Magellan. Leur masse totale varie, depuis les elliptiques géantes dont les masses sont même supérieures à celle de notre propre galaxie, jusqu'aux plus petites des galaxies, à peine plus massives que les plus grands amas globulaires. Elles diffèrent dans leur moment angulaire total, et pour les galaxies spirales, dans le rapport entre la masse du disque et celle du bulbe central. Elles diffèrent par leur contenu relatif de matière interstellaire, et finalement, elles diffèrent beaucoup dans l'intensité et la distribution spatiale des ondes radio qu'elles émettent.

La distribution des galaxies dans l'espace est très inégale. La grande majorité d'entre elles se présentent sous forme d'amas. Quelques groupes de galaxies sont très riches, contenant des milliers de galaxies dans un rayon de quelques millions de parsecs, le nombre de galaxies par unité de volume pouvant y varier de trois ordres de grandeur par rapport à sa valeur moyenne sur le groupe entier. D'autres amas contiennent seulement quelques douzaines de galaxies, ou même moins, et le rapport maximal entre la densité locale de galaxies et sa valeur moyenne est seulement de l'ordre de dix. Notre Galaxie, la Galaxie d'Andromède, et à peu près deux douzaines seulement d'autres galaxies moins volumineuses, forment un tel petit groupe.

A une échelle dépassant les cent millions de parsecs, toutefois, le nombre de galaxies par unité de volume est d'une constance frappante. Autrement dit, à l'échelle de cent millions à un milliard de parsecs, on peut affirmer avec un haut degré de certitude que l'Univers est uniforme.

A ce propos, je dois mentionner une importante composante de l'espace intergalactique, appelée la radiation micro-

ondes. Il s'agit d'une émission d'ondes radio de longueurs d'ondes comprises dans le domaine centimétrique et millimétrique, et qui atteint l'observateur de toutes les directions avec un degré très élevé d'isotropie.

Les variations relatives d'intensité par rapport à la direction sont en effet très inférieures à un dixième de pour cent. Ce degré d'isotropie exclut la possibilité d'une origine galactique, et nous en concluons que le rayonnement micro-ondes qui peut être décrit comme un rayonnement de Planck correspondant à une température d'environ trois degrés Kelvin de nos jours, se trouve partout dans l'espace intergalactique avec une densité d'énergie constante.

Revenons maintenant au problème de suivre le mouvement des galaxies dans la partie observable de l'Univers en remontant le temps. Les recherches sur la masse des galaxies et leur nombre par unité de volume, nous ont amené à déterminer la densité moyenne de la matière galactique dans sa répartition globale. Ces recherches ont été complétées par des investigations concernant la masse totale de la matière intergalactique contenue dans les amas de galaxies, riches ou petits; c'est une composante non négligable puisqu'elle s'avère être du même ordre de grandeur que la masse totale contenue dans les galaxies proprement dites.

La connaissance de ces densités nous fournit une base pour le calcul de l'influence de la gravité sur le flux de Hubble. Un calcul effectué dans le cadre de la théorie de la relativité générale d'Einstein, et contenant cette information au départ, nous permet de déterminer la variation de la vitesse du flux de Hubble, lorsqu'on recule dans le temps. Le calcul est énormément simplifié par le fait que l'Univers, à l'échelle d'une centaine de millions de parsecs, peut être considéré comme homogène et isotrope.

Il s'avère que la densité moyenne de matière est si faible, que les forces de gravité correspondantes n'exercent pas une grande influence sur le courant de Hubble. L'Univers en ex-

pansion tel que nous le connaissons actuellement peut ainsi être suivi dans un passé lointain. On a découvert, il y a environ 13 milliards d'années, que toute la matière contenue dans les galaxies et l'espace intergalactique, était rassemblée dans un volume infiniment plus petit que de nos jours. La densité et la température de la matière y étaient extrêmement élevées. C'est un fait très remarquable que ce chiffre de 13 milliards d'années, que nous pouvons appeler l'âge de l'Univers, coïncide de si près avec l'âge des plus vieilles étoiles de notre Galaxie, qui est de 12 milliards d'années environ. En fait, les deux grandeurs coïncident de près avec les erreurs de détermination.

Nous allons essayer maintenant de retracer les principales caractéristiques de l'expansion à partir de la situation que nous venons de décrire, en avançant cette fois dans le temps, et en ne nous arrêtant que sur celles qui ont un rapport important dans la formation et l'évolution des galaxies.

Lorsque l'expansion à partir de phases initiales caractérisées par des températures et des densités de matière extrêmement élevées a avancé jusqu'au point où la température atteint environ 3000 degrés Kelvin, la densité étant de l'ordre de mille atomes par centimètre cube, la matière qui résulte de réactions nucléaires précédentes, consiste en un mélange d'hydrogène et d'hélium (l'hydrogène s'y trouvant en prépondérance), avec d'infimes quantités d'autres éléments. A ce moment précis, pratiquement tout l'hydrogène qui auparavant était ionisé se recombine et devient neutre. Les calculs montrent qu'une perturbation dans la densité de matière, présente à ce moment là, peut croître indéfiniment. De grands amas de matière peuvent se former et les embryons de galaxies — proto-galaxies — s'en séparer. Tout cela arrive à un point très proche du début de la ligne du temps qui joint la phase des très hautes densités à l'époque actuelle. Les radiations, émises à ce moment et observées aujourd'hui, sont déplacées vers le rouge par un facteur mille environ en longueur d'ondes. Il faut admettre qu'il n'est pas possible encore de réconcilier,

par des calculs théoriques, tous les écarts d'uniformité de répartition de densité et de vitesse dans la période primitive de l'évolution, avec ces mêmes écarts à l'époque où les proto-galaxies commencent de se former. Ce que l'on a fait, c'est de postuler certaines propriétés générales de la matière en rapport avec la distribution des densités et des vitesses à l'époque de la formation des proto-galaxies, et de calculer à partir de là le développement jusqu'à nos jours.

D'une grande importance est le fait que la moindre perturbation de densité mettant en jeu des masses de l'ordre de celles des proto-galaxies, ira en augmentant fortement dans l'Univers en expansion. Un contraste de densité de quelques pour cent, sera amplifié typiquement par un facteur mille.

Lorsqu'une proto-galaxie s'est séparée, elle sera d'abord en expansion suivant la tendance générale de l'expansion de l'Univers. Mais, à un moment donné, la gravitation Newtonienne l'emportera, et une contraction, un flux vers le centre de la proto-galaxie, commencera. La proto-galaxie a alors atteint un point qui correspond au moment où notre description de l'évolution de notre propre Galaxie commence.

Les propriétés de la proto-galaxie à ce moment, dépendront des propriétés dont elle était douée lors de sa séparation. A cette époque les proto-galaxies étaient différentes en masse et probablement en densité interne et en répartition de vitesse. Elles différaient aussi, ou bien étaient arrivées à être différentes, en ce qui concerne leur moment angulaire. Une proto-galaxie dans la phase où elle est encore de forme irrégulière, peut acquérir un moment angulaire par l'interaction gravitationnelle avec des proto-galaxies voisines. Cette diversité expliquera au moins partiellement la diversité dans le monde des galaxies résultantes.

Considérons l'évolution d'une proto-galaxie à partir du point de sa plus grande expansion, lorsque commence l'effondrement vers le centre. Elle peut, comme nous avons vu, évoluer en une structure à halo, avec noyau central et disque

tournant, c'est à dire elle peut devenir une galaxie à spirale. Mais si le résultat du flux vers le centre et la formation d'étoiles dans le courant des nuages est tel que toute la matière interstellaire soit transformée en étoiles au cours de la première phase de l'écroulement, alors nous n'aurons plus la formation d'un disque, et la structure qui en résultera sera une galaxie elliptique avec un degré d'aplatissement dépendant de son moment angulaire.

D'autres facteurs encore exerceront leur influence sur l'évolution des galaxies. Cette évolution peut prendre place dans un milieu tel que la galaxie devienne un des membres d'une riche agglomération. Toute la matière qui, en dernier ressort, devient un constellation riche en galaxies sera soumise à un processus de développement, recommençant de nouveau par une phase d'expansion suivant la tendance générale d'expansion de l'Univers, suivie d'une contraction à une densité assez haute de galaxies par unité de volume, contraction qui prend fin par une relaxation violente dans un état d'équilibre entre l'énergie cinétique et l'énergie de gravitation. Pendant cette évolution, les forces des galaxies voisines, peuvent exercer leur influence sur le développement. Une telle interaction entre galaxies peut aussi avoir lieu dans les groupes plus petits.

Un autre facteur important est l'interaction entre une proto-galaxie, ou une galaxie, et la matière intergalactique qui l'entourne. Lorsqu'une proto-galaxie a atteint l'état d'expansion maximale et commence à se contracter, il peut se produire encore un influx de matière environnante, et ceci peut avoir une influence sur la suite du développement. Au cours des étapes suivantes, diverses formes d'interaction, peuvent se produire, aboutissant ou bien à une aggrégation de matière dans la galaxie, accréation, ou bien à une éjection de matière interstellaire galactique.

Le résultat dépendra de la vitesse à laquelle la galaxie se meut à travers la matière intergalactique, et des densités res-

pectives de la matière intergalactique et interstellaire dans la galaxie.

Un simple exemple qui illustre bien la chose est l'éjection de matière interstellaire par les amas globulaires lors de leur passage à travers la matière interstellaire du disque ou à travers la matière interstellaire encore plus ténue du halo. La matière qui s'écoule continuellement des étoiles des amas globulaires qui ont atteint la phase finale de leur évolution stellaire, est ainsi éliminée, de sorte qu'il reste seulement un très petit résidu échappant à l'observation.

Dans les amas riches en galaxies il peut y avoir des cas où la matière interstellaire du disque d'une galaxie à spirale est éjectée au cours de son mouvement relativement rapide à travers la matière intergalactique. La galaxie en spirale se transformera en un genre de galaxie appelée galaxie S0.

D'autre part, considérons une galaxie elliptique géante qui se meut à une vitesse assez réduite à travers la matière intergalactique dans un riche groupement de galaxies. Ici l'accrétion, spécialement dans la région centrale avec son grand nombre d'étoiles par unité de volume et la forte attraction gravitationnelle qui en résulte, peut bien être le facteur le plus important.

Des études sont aujourd'hui en cours qui pourraient conduire à des importants résultats supplémentaires concernant le sort final de la matière expulsée des étoiles pendant leur évolution et la matière assimilée dans certains cas à partir de l'espace intergalactique environnant. Le rôle joué par l'éjection de matière interstellaire, non seulement sous l'action de la matière intergalactique mais aussi par l'effet des explosions de supernovae dans la galaxie elle-même, sera ainsi plus étudié en détails, de même que les possibilités d'« accrétions » substantielles dans la région centrale.

Ces considérations nous amènent au point final de notre discussion des problèmes de l'évolution des galaxies dans l'Univers en expansion.

Une des plus importantes découvertes concernant les galaxies qui ait été faite ces dernières années, est celle des "quasars". Ces objets peuvent atteindre une luminosité plus grande même que celle des galaxies de plus fort rayonnement, et l'énergie qui est à l'origine de cette radiation des quasars est générée dans un volume de diamètre inférieur à un parsec.

On ne peut prétendre avoir compris entièrement le mécanisme par lequel le quasar génère et émet son énergie. Cependant, de solides arguments ont été avancés en faveur de la description selon laquelle les quasars représentent des phases spéciales dans l'évolution de la galaxie, phases durant lesquelles il y a une activité violente dans la région du noyau, d'une telle amplitude que les émissions qui l'accompagnent noient, ou presque, pour l'observateur l'émission provenant du reste de la galaxie. On espère que des recherches futures sur le phénomène d'accrétion de la matière par les noyaux galactiques, en même temps que l'analyse du sort de la matière ainsi accumulée, nous permettront de comprendre le mécanisme de la libération d'énergie dans les quasars.

A ce sujet, il est très important que les observations des galaxies aient révélé toute une série de phénomènes qui se rapportent à l'activité dans les noyaux galactiques. Le phénomène le plus frappant entre tous est celui de l'émission par les galaxies d'ondes radio intenses. Ce que l'on observe ici est vraisemblablement le résultat de la conversion de l'énergie qui se trouve dans un noyau galactique actif en courants d'énergie de particules élémentaires de haute énergie qui, au moins dans certains cas, abandonnent le noyau en suivant des trajectoires opposées, toutes deux d'une longueur énorme, et en énergie magnétique. Dans cette discussion sur l'évolution des galaxies, j'ai omis, dans le désir d'être bref, de mentionner des points douteux ou incertains.

Les chercheurs actifs dans le domaine sont bien conscients des incertitudes: celles concernant les phases de l'évolution stellaire rapide, celles concernant le rôle relatif des processus

de base de contraction, de fragmentation et d'agrégation dans l'Univers en expansion, et enfin celles qui ont trait à la détermination de l'importance du rôle de l'attraction gravitationnelle dans l'Univers en expansion. Il est aussi très important de ne pas oublier que les lois fondamentales de la nature déduites des observations actuelles, peuvent changer avec le temps. Il me suffit à ce propos de renvoyer aux travaux de Paul Dirac sur la gravitation et la masse.

La confrontation continue de la théorie et de l'observation est essentielle. Il n'est pas exclu que l'idée que nous avons aujourd'hui de l'évolution des galaxies se modifie avec le temps sur des points importants; mais il est hors de doute qu'une grande partie des conclusions actuelles ne vont pas changer dans un proche avenir.