

LA FORMATION DES GALAXIES

Jonathan Freundlich

Projet bibliographique effectué en 2007 sous la direction de Gary Mamon, Institut d'Astrophysique de Paris

On parle aujourd'hui de modèle standard de la cosmologie pour décrire un modèle cosmologique qui retracerait de la façon la plus satisfaisante les grandes lignes de l'histoire de l'Univers. Le terme est apparu dans les années 2000 avec l'arrivée d'une grande quantité d'observations astronomiques : nouveaux catalogues d'objets célestes, détection de plus en plus précise des faibles inhomogénéités du fond diffus cosmologique, observation de supernovae lointaines.

C'est en 1917 qu'Albert Einstein propose le premier modèle cosmologique fondé sur la théorie de la relativité générale. En 1924, Edwin Hubble prouve que les objets célestes diffus que l'on appelait alors « nébuleuses spirales » sont en dehors de notre galaxie, la Voie Lactée, et qu'il s'agit d'autres galaxies : l'Univers s'étend bien au delà de ce que l'on imaginait et la cosmologie doit changer d'échelle. Pendant les premières décennies du $XX^{ième}$ siècle, l'astronome américain Vesto Slipher accumule des mesures du décalage vers le rouge que subissent les spectres de ces nébuleuses et y voit les signes d'une expansion de l'Univers ; en 1929, à partir de ces mesures, Hubble publie la loi qui porte son nom et selon laquelle le décalage d'une galaxie est proportionnel à son éloignement. Pour décrire l'Univers et son expansion dans un cadre relativiste, le physicien belge Georges Lemaître propose une famille de modèles cosmologiques, nommés aujourd'hui modèles de Friedmann-Lemaître étant donné que leurs aspects mathématiques ont été explorés indépendamment par le physicien soviétique Alexandre Friedmann. Dans cette famille de modèles, on peut distinguer deux classes : d'un côté des modèles de Big Bang, où l'expansion se déroule depuis un temps fini, et de l'autre des modèles d'Univers stationnaire, où l'expansion se poursuit depuis une durée infinie et où l'Univers conserve toujours le même aspect[10]. L'existence et les propriétés du fond diffus cosmologique, observé pour la première fois en 1964, ne sont explicables que par des modèles de Big Bang, qui se sont donc imposés depuis lors. Un certain nombre de paramètres permettent de décrire la structure de ces modèles, comme la courbure de l'espace, le taux d'expansion ou le contenu énergétique de l'Univers ; leur mesure est néanmoins délicate. Une des tâches de la cosmologie actuelle consiste à spécifier le bon modèle pour décrire l'Univers, c'est-à-dire la forme de l'espace-temps. Un certain nombre de questionnements demeurent, notamment concernant l'accélération de l'expansion cosmique et l'existence d'une nouvelle forme de matière que l'on ne peut observer, la matière noire.

Au sein de ces modèles d'Univers, la formation des galaxies et des grandes structures est un problème complexe. La question essentielle consiste à comprendre comment sont apparues des inhomogénéités aussi importantes que les étoiles, les galaxies, ou les amas de galaxies, alors que l'Univers était initialement très homogène, comme le postulent les modèles de Big Bang et comme le montre le fond diffus cosmologique. Si l'idée de départ des scénarios, basés sur la notion d'instabilité gravitationnelle, est assez simple, la non linéarité des équations et la nécessité de prendre en compte un grand nombre de particules requièrent de faire appel à des simulations numériques. Après avoir rappelé les grandes lignes du modèle standard de la cosmologie, en insistant sur le problème de la matière noire et sur l'évolution des fluctuations, nous présenterons le modèle hiérarchique de formation des galaxies. Nous finirons par évoquer un problème particulier, la distribution bimodale des galaxies, qui nous permettra de mettre en évidence les interactions entre observations, simulations et théorie en cosmologie.

Table des matières

1	Le modèle standard de la cosmologie	4
1.1	Principe du modèle Λ CDM	4
1.2	La matière noire	4
1.3	L'évolution des fluctuations	6
2	La formation des galaxies	7
2.1	Le principal mécanisme : l'instabilité gravitationnelle	7
2.2	La croissance des fluctuations à la recombinaison	7
2.3	Le modèle hiérarchique	8
3	La bimodalité des galaxies	10
3.1	Bimodalité de la distribution des galaxies	10
3.2	Choc viriel et écoulement de gaz froid	10
3.3	Explication de la bimodalité	11

1 Le modèle standard de la cosmologie

1.1 Principe du modèle Λ CDM

Le modèle standard de la cosmologie, aussi appelé Λ CDM, abréviation de *Lambda Cold Dark Matter*, est le modèle le plus simple à ce jour en accord avec les phénomènes observés en cosmologie. Il s'appuie notamment sur les données obtenues grâce aux récents catalogues d'objets célestes¹, l'observation de plus en plus précise des anisotropies du fond diffus cosmologique dont les fluctuations sont très petites², des supernovae lointaines et des observations aussi variées que les abondances en éléments légers dans l'Univers, les effets de lentille gravitationnelle ou les propriétés des amas de galaxies.

Il s'agit d'un modèle de Friedmann-Lemaître avec Big Bang où la courbure spatiale est nulle; il postule l'existence d'une constante cosmologique Λ ainsi que l'existence de matière noire non baryonique, c'est-à-dire non constituée de protons et de neutrons. La constante cosmologique est un terme correspondant à une énergie sombre, qui expliquerait l'accélération de l'expansion de l'Univers : cette accélération fut observée en 1998 grâce aux mesures du décalage vers le rouge (*redshift*) de supernovae lointaines[18]. Comme tous les modèles de Friedmann-Lemaître, le modèle Λ CDM est fondé sur le principe cosmologique. Celui-ci stipule que l'Univers à grande échelle peut être considéré, en bonne approximation, comme homogène et isotrope. Cette hypothèse est bien vérifiée par les observations de la répartition des structures à grande échelle et par la grande homogénéité du fond diffus cosmologique. Il faut néanmoins reconnaître que ce principe n'est qu'une approximation vis-à-vis d'un Univers constitué de galaxies et d'amas de galaxies. Le modèle standard de la cosmologie suppose que le spectre des fluctuations primordiales est quasi-invariant d'échelle, il postule aussi l'existence d'une période d'expansion exponentielle après le Big Bang, appelée inflation.

1.2 La matière noire

Le modèle Λ CDM suppose l'existence d'une matière noire froide, non baryonique. Les premiers indices qui ouvrirent la voie vers cette hypothèse furent les courbes de vitesse des étoiles en périphérie de galaxies[4]. Ainsi en 1933, alors qu'il cherche à déterminer la masse de l'amas de Coma en mesurant les vitesses des sept galaxies qui le constituent, l'astronome suisse Fritz Zwicky est surpris de constater qu'il faudrait 100 à 500 fois plus de matière que celle qui est observée pour expliquer les grandes valeurs de ces vitesses : les lois de Newton relient en effet la vitesse de rotation autour d'un astre à la masse de celui-ci. Le même phénomène est de nouveau observé en 1936 par Sinclair Smith qui s'intéresse à l'amas de Virgo. Si le problème ne suscite pas un grand intérêt à cette époque, il resurgit dans les années 1970 lorsque l'astronome américaine Vera Rubin étudie la rotation des galaxies spirales. Les étoiles situées à la périphérie d'une galaxie semblent tourner trop vite, au point que la courbe de rotation de certaines galaxies spirales est plate : la vitesse ne décroît pas à mesure que l'on s'éloigne du centre de la galaxie. Dans ces structures cosmiques, la plupart des étoiles sont rassemblées près du centre galactique, les autres étoiles étant principalement situées dans les bras spiraux où la densité de matière visible décroît presque exponentiellement à mesure que l'on s'éloigne du centre de la galaxie. En conséquence de quoi la vitesse des étoiles à l'intérieur des bras spiraux devrait également suivre une loi exponentielle, ce qui n'est pas observé. Pour expliquer cette dynamique, on peut imaginer l'existence d'un halo de matière non visible dont la masse serait égale à plus de cinq fois la masse visible de la galaxie et qui serait réparti autour de la partie visible.

¹SDSS, *Sloan Digital Sky Survey*, a permis l'observation de presque deux millions d'objets, l'obtention des spectres de plus de 800 000 galaxies et 100 000 quasars; 2dFGRS, *Two-degree-Field Galaxy Redshift Survey*, a recueilli les spectres de 245 591 objets dont 232 155 galaxies, 12 311 étoiles et 125 quasars entre 1997 et 2002.

²BOOMERanG, *Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics*, entre 1997 et 1998; Archeops, autre ballon stratosphérique ayant effectué cinq vols entre 1999 et 2002; et plus récemment WMAP, *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*.

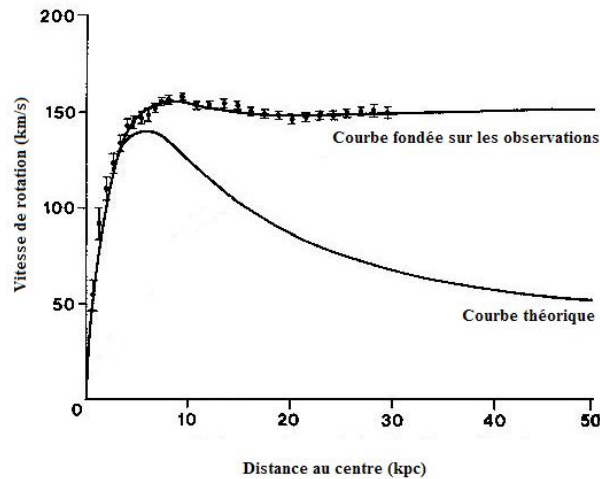


FIG. 1 – La vitesse de rotation des étoiles au sein d’une galaxie ne varie pas comme prévu en fonction de la distance au centre. La courbe théorique a été déterminée à partir des objets visibles; elle est contredite par les observations qui montrent que la vitesse ne diminue pas à mesure que l’on s’éloigne du noyau galactique[5].

Pendant quelques années, des objets de matière ordinaire, tels des astéroïdes, des planètes extrasolaires ou des étoiles à neutrons, ont prétendu au titre de composants de la matière noire[5]. Cependant, des études ultérieures ont montré qu’il ne peut s’agir de matière baryonique : la théorie du Big Bang établit de façon précise la quantité de baryons qui était présents aux premiers instants de l’Univers. On a d’abord pensé au neutrinos, électriquement neutres et peu enclins à interagir avec la matière ordinaire. Mais la masse qu’on leur attribue depuis peu est trop faible pour expliquer la masse des halos et leurs vitesses seraient trop grandes pour permettre aux halos de se former. Les neutrinos auraient constitué une « matière noire chaude », dont la très grande vitesse aurait dispersé les grumeaux du plasma primordial qui ont depuis formé les galaxies et les amas de galaxies[13]. La majeure partie de la matière noire doit donc être « froide », c’est-à-dire que la vitesse moyenne des particules de matière noire était notablement inférieure à celle de la lumière aux premiers temps de l’histoire cosmique. On recherche donc une particule qui, de même que le neutrino, interagit peu avec la matière ordinaire, mais beaucoup plus lente et plus massive. Certaines extensions du modèle standard de la physique des particules, comme la supersymétrie, offrent des candidats plausibles, les WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*). Ces particules interagissent par interaction faible et gravitationnelle; comme elles n’interagissent pas de manière électromagnétique, on ne peut les voir directement, et le fait qu’elles soient indifférentes à l’interaction nucléaire forte les empêche de réagir avec les noyaux atomiques. La supersymétrie associe à chaque particule bosonique (de spin entier) un « superpartenaire » de spin demi entier (un fermion). Le neutralino, superpartenaire fermionique à la fois du photon (boson qui transmet la force électromagnétique) et du boson Z^0 (qui transmet l’interaction nucléaire faible), serait un bon candidat pour la matière noire : cette particule serait plus lourde que toutes les particules connues, mais la plus légère des particules supersymétriques, ce qui assure sa stabilité.

Le modèle Λ CDM semble à ce jour le modèle le plus approprié pour décrire l’Univers, mais il n’en demeure pas moins que la matière noire n’a toujours pas été détectée directement. Au problème de l’incompatibilité des orbites galactiques observées et des prédictions newtoniennes, l’hypothèse de l’existence de la matière noire n’est pas la seule solution. Pourquoi en effet ne pas remettre en cause la loi de la gravitation elle-même? Le physicien israélien Mordechai Milgrom a ainsi proposé en 1983 de modifier la deuxième loi de Newton, de manière à changer la relation entre la force et l’accélération lorsque celle-ci est faible. Il s’agit du point de départ de la théorie MOND (*MOdified Newtonian Dynamics*), qui explique sans faire appel à la matière noire les courbes de rotation des galaxies spirales, et ce de manière extrêmement précise[14][15]. Cette théorie introduit une nouvelle constante universelle a_0 ayant la dimension d’une accélération : quand l’accélération est très supérieure à a_0 , la deuxième loi de Newton s’applique; à l’inverse, quand l’accélération est petite par rapport à a_0 , la deuxième loi de Newton est modifiée et la force devient proportionnelle au carré de l’accélération. Cette théorie proposée de manière *ad hoc* a su expliquer un certain nombre d’observations sur les galaxies elliptiques, les groupes et les amas de galaxies de manière très précise, mais l’absence de théorie sous-jacente pose problème.

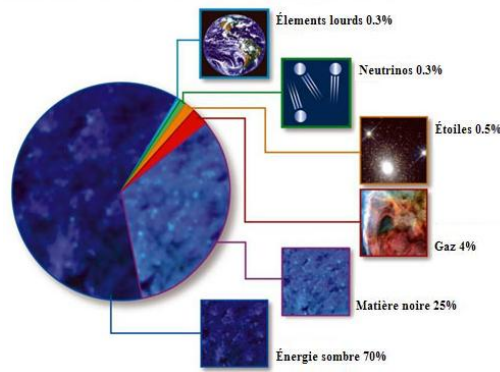


FIG. 2 – La composition de l’Univers : les étoiles et la matière visible ne constituent que 0.5% du total et la matière ordinaire (baryonique) 5%. Quand aux neutrinos, qui constituent une matière noire chaude, leur faible masse limite leur contribution à quelques dixièmes de pourcent. Il existe donc de très grandes quantités de matière noire froide (qui pourrait être constituée de neutralinos). Enfin, l’accélération de l’expansion de l’Univers et la géométrie quasi euclidienne de l’espace révèlent la présence de 70% d’une substance encore plus mystérieuse, l’énergie sombre, liée à l’existence d’une constante cosmologique Λ . <http://www.lsst.org/Science/darkenergy.shtml>

1.3 L’évolution des fluctuations

L’idée de départ des scénarios de formation des galaxies et des grandes structures dans l’Univers est basée sur la notion « d’instabilité gravitationnelle » : un excès local de matière va attirer la matière voisine sous l’effet de sa propre gravitation et va s’amplifier. Les fluctuations de densité auraient été créées très tôt dans l’histoire de l’Univers, puis se seraient amplifiées sous l’effet de leur propre poids jusqu’à former les objets structurés que nous observons aujourd’hui. Les différents modèles de formation des galaxies correspondent à une trame commune jalonnée des étapes suivantes[9] :

- Création de fluctuations initiales ;
- Amplification relativiste : inflation ;
- Gel ou amortissement ;
- Recombinaison (pour ce qui est des baryons) ;
- Croissance linéaire post-recombinaison ;
- Croissance non linéaire ;
- Effondrement des objets.

L’extrapolation des lois de la physique indique qu’au moment du Big Bang, il y a environ 13.7 milliards d’années, toutes les distances entre les objets de l’Univers aujourd’hui visible étaient quasi nulles, tandis que la température et la densité étaient infinies[3]. Une minute après, la température était similaire à celle qui règne au cœur des étoiles actuelles et autorisait la fusion des premiers noyaux atomiques. Quelques 380 000 ans plus tard, lorsque la température ne dépassait plus 3000K, les premiers atomes se sont formés : il s’agit de la recombinaison. Le rayonnement électromagnétique, qui cessa alors d’interagir avec la matière, fut laissé à lui-même, refroidissant avec l’expansion de l’univers. Il constitue aujourd’hui le fond diffus cosmologique dont la température est d’environ 3K. Au tout début de l’histoire de l’Univers, d’inévitables fluctuations quantiques ont lieu ; le modèle d’inflation, qui fait partie intégrante du modèle standard de la cosmologie, permet d’expliquer la transformation de ces fluctuations microscopiques en fluctuations à très grande échelle. L’inflation serait une expansion accélérée où les distances augmentent exponentiellement avec le temps. Après la phase d’inflation, les fluctuations macroscopiques ont toutes, en première approximation, la même amplitude quelle que soit leur taille : la distribution est invariante d’échelle.

2 La formation des galaxies

2.1 Le principal mécanisme : l'instabilité gravitationnelle

La formation des structures se ramène essentiellement à la compétition entre la croissance des perturbations sous l'effet de la gravitation et l'expansion de l'Univers, qui tend à diluer toute surdensité locale.

Le problème de l'instabilité d'une distribution homogène de matière a été abordé pour la première fois par le physicien britannique James Jeans en 1902 : sa théorie tient compte de deux facteurs, la gravité qui pousse la matière à se condenser et la pression qui tend à diminuer les inhomogénéités. Cette description s'applique dans un milieu statique, à partir des équations hydrodynamiques et de l'équation de Poisson qui permet de caractériser la gravitation[6]. Plus la masse d'une fluctuation est élevée, plus l'importance de la gravitation est intense par rapport à celle de la pression. La valeur critique qui sépare les deux domaines se nomme masse de Jeans : celle-ci fixe la limite inférieure des perturbations qui vont croître au cours du temps.

Pour tenir compte d'un Univers en expansion, il convient d'utiliser la relativité générale. Dans un modèle de Friedmann-Lemaître, les équations fondamentales de la relativité générale -les équations d'Einstein- se simplifient pour donner les équations de Friedmann. Dans le cas de petites fluctuations, c'est-à-dire lorsque la fluctuation relative $\delta(\vec{r}) = \frac{\rho(\vec{r}) - \rho_0}{\rho_0}$, où $\rho(\vec{r})$ est le champ de densité et ρ_0 la densité moyenne, est très petite devant 1, il est possible de linéariser ces équations pour obtenir l'équation suivante[16] :

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} + 2\frac{\dot{a}}{a}\frac{d\delta}{dt} = (4\pi G\rho_0 - (\frac{c_s k}{a})^2)\delta$$

avec $a(t)$ le facteur d'échelle, k le vecteur d'onde comobile, c_s la vitesse du son telle que $c_s^2 = \frac{\partial P}{\partial \rho}$ et G la constante de Newton. Le terme de droite de cette équation montre l'effet de la compétition entre la gravitation et le gradient de pression. Le mode de croissance va dépendre du type d'Univers choisi par l'intermédiaire de la dépendance temporelle de $a(t)$: il s'agit d'un Univers sans courbure spatiale dans le cas du modèle standard de la cosmologie.

2.2 La croissance des fluctuations à la recombinaison

Après la période d'inflation, les fluctuations sont suffisamment petites pour que l'approximation linéaire soit valable : on parle de croissance linéaire des perturbations. La phase de croissance linéaire évolue jusqu'à avoir des valeurs $\delta \geq 1$, étant donné que les fluctuations sont aujourd'hui nettement au-delà du domaine linéaire (à l'échelle des galaxies ou des amas, δ dépasse très fortement la valeur 1). La phase linéaire aboutit donc sur une phase non linéaire dont on ne peut faire le traitement aussi simplement : on suppose qu'elle est suffisamment efficace pour que, à peine amorcée, elle aboutisse à la formation de structures par effondrement gravitationnel. Seules des simulations numériques du phénomène de condensation gravitationnelle peuvent alors nous servir de guide.

Dans le cas de baryons adiabatiques ou de la matière noire chaude (neutrinos), le spectre des perturbations à la recombinaison sera caractérisé par une coupure aux petites échelles : les échelles disponibles ($10^{13} - 10^{15} M_\odot$) sont caractéristiques de celles des amas ou des superamas. Les galaxies se forment ensuite par fragmentation de ces grandes structures : c'est le scénario des crêpes (*Zeldovitch pancakes*) ou « top-down »[17]. Comme les régions de surdensité ont peu de chance d'être sphériques, si l'effondrement est plus rapide dans une direction, l'inégalité des vitesses se maintient et on aboutit à des objets à une ou deux dimensions (filaments, crêpes), d'où le nom.

Dans le cas des baryons isothermes ou de la matière noire froide, ce sont les petites échelles qui deviennent non linéaires en premier, c'est-à-dire qui vont former des condensations (avec $\delta > 1$) se découplant de l'expansion générale, et ce autour de la masse de Jeans après la recombinaison ($M_J \approx 10^5 - 10^6 M_\odot$). Les premiers objets seront subgalactiques, les structures plus grandes se formant successivement par regroupement gravitationnel : c'est le scénario hiérarchique, ou « bottom-up »[6].

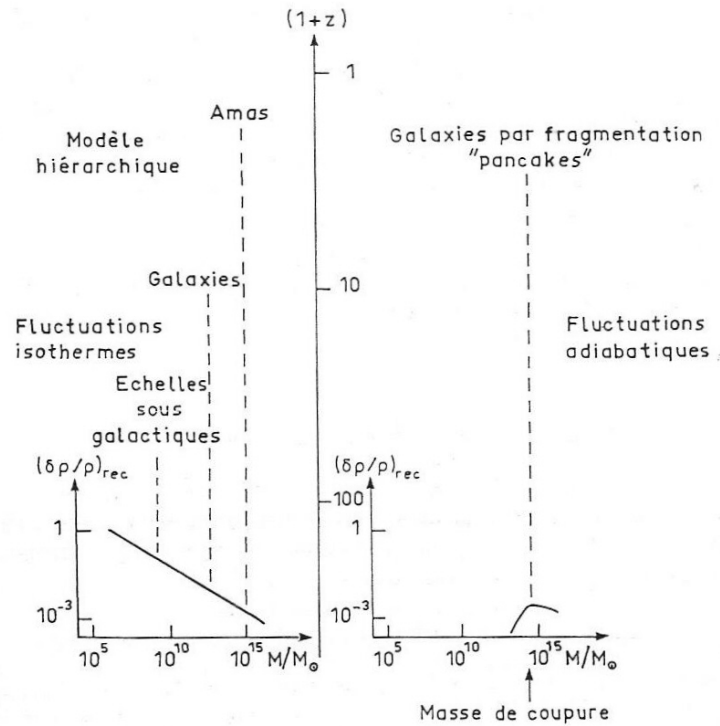


FIG. 3 – La figure montre deux formes possibles du spectre des fluctuations à la recombinaison. Pour des fluctuations isothermes ou de la matière noire froide, les objets dans le domaine $10^6 - 10^8 M_\odot$ se forment peu après la recombinaison ; les galaxies et les amas se forment ensuite et constituent une structure hiérarchique. Pour les fluctuations adiabatiques ou de la matière noire chaude, les premières échelles à se condenser sont intermédiaires entre celles des galaxies et des amas[6].

2.3 Le modèle hiérarchique

Dans les années 1920, l’astronome Edwin Hubble établit une classification des galaxies en trois grandes familles : les galaxies elliptiques, les spirales et les spirales barrées. Si cette « séquence de Hubble » n’était au départ qu’un moyen de classer les galaxies, on pouvait aussi imaginer que les galaxies évoluaient le long de la séquence, des premières galaxies elliptiques aux spirales, comme le suggéra Jeans en 1928. Selon ce modèle, dit de « formation monolithique », les galaxies, apparues tôt dans l’histoire de l’Univers, sont issues de l’effondrement de gros nuages de gaz primordial sous l’effet de leur propre gravité. La morphologie d’une galaxie aurait alors été déterminée une fois pour toutes par une sorte de compétition entre la rapidité avec laquelle le nuage s’effondre et la vitesse à laquelle le gaz interstellaire y est transformé en étoiles. Les éventuelles influences de l’environnement, par exemple les collisions entre galaxies, jouent ici un rôle mineur dans l’évolution des galaxies.

Si ce modèle s’accorde bien avec un Univers constitué de baryons adiabatiques ou dans le cas d’une matière noire chaude, on estime aujourd’hui que la plupart de la matière dans l’Univers s’est condensée au sein des puits de potentiel de la matière noire froide[20]. En effet, un modèle purement baryonique est pour l’instant totalement abandonné à cause de son incapacité à prédire la formation des galaxies sans créer de trop importantes fluctuations du rayonnement du fond diffus cosmologique. La répartition de la matière dans l’Univers se comprend donc désormais comme la conséquence d’un processus hiérarchique, où la formation des galaxies n’est pas un évènement unique, mais un mécanisme continu : de petites galaxies s’assemblent pour en former de plus grandes, au cours de fusions successives. Lors de collisions et d’interactions rapprochées entre deux galaxies, les forces de marée les déforment et leur arrachent de la matière. Ainsi, la morphologie d’une galaxie dans la séquence de Hubble n’est pas fixée une fois pour toutes, mais elle évolue au gré des influences de son environnement. L’observation du fond diffus infrarouge confirme ce scénario puisqu’elle montre que les interactions

rapprochées et les collisions de galaxies étaient nombreuses par le passé[11]. De même, les résultats des simulations numériques s'accordent très bien avec ce modèle : on peut suivre à chaque pas de la simulation l'évolution des galaxies pour constituer des « arbres de fusions » (*merging trees*), qui permettent de suivre l'histoire des fusions successives[19]. Les simulations parviennent à reconstituer grossièrement les propriétés observées, mais il reste des problèmes de détail, comme le fait qu'elles prédisent trop de petites structures.

La matière noire étant justement noire, elle ne peut pas perdre son énergie en rayonnant, ce qui lui interdit de se condenser aussi efficacement que la matière ordinaire en grumeaux plus petits qu'une galaxie (étoiles, planètes) : elle s'organise en halos au sein desquels se trouve la matière ordinaire. La matière ordinaire, quant à elle, peut évacuer son énergie sous forme de rayonnement, de sorte qu'elle s'effondre davantage. Le gaz chaud se refroidit, puis s'écoule vers le centre du halo. En tombant, la vitesse de la matière ordinaire augmente du fait de la conservation du moment cinétique. Sous l'action de la force centrifuge, le gaz prend la forme d'un disque stable, perpendiculaire à l'axe de rotation initial du halo. À l'intérieur de ce disque, le gaz se fragmente en nuages qui donnent naissance aux premières étoiles. À la fin de leur évolution, les étoiles les plus massives de ces premières générations explosent et rejettent dans l'espace des éléments lourds synthétisés dans leur cœurs, ce qui donne naissance aux premières poussières interstellaires. Cela conduit aussi au phénomène de *feedback* : lorsqu'elles meurent, les étoiles éjectent du gaz, des éléments lourds et de l'énergie dans leur environnement. L'énergie émise chauffe le gaz restant et peut produire des vents galactiques qui réduisent les galaxies et inhibent la formation de nouvelles étoiles.

Il est possible de réunir tous ces ingrédients dans des modèles semi-analytiques, comme GalICS (*Galaxies In Cosmological Simulations*)[8][12] : ce modèle combine les résultats de grandes simulations à N corps et des recettes semi-analytiques pour décrire le sort des baryons au sein des halos de matière noire. Après avoir accumulé des données sur les propriétés du halo, on construit un arbre de fusions, puis une composante baryonique est ajoutée : la principale hypothèse est que le comportement général de la distribution de matière est déterminée par le champ de densité de la matière noire et donc que la densité en baryons ne représente qu'une petite perturbation par rapport à la densité totale. De plus, on suppose aussi que la seule force s'exerçant entre les halos est la gravité, de manière à ce qu'à un temps donné, chaque halo puisse être considéré comme indépendant des autres. Avec ces simulations numériques, on s'aperçoit que ces structures ne sont pas isolées : la compétition entre l'expansion de l'Univers et l'attraction gravitationnelle pousse la matière à se rassembler en de gigantesques structures cosmiques en forme de feuillets, d'amas ou de filaments. À l'intérieur de ces structures, les petits halos fusionnent constamment. On pense que les premières fusions débouchent sur la formation de galaxies elliptiques ; par la suite, si une galaxie elliptique bénéficie d'un nouvel apport de gaz, en provenance des régions périphériques du halo, un nouveau disque se formera autour d'elle.

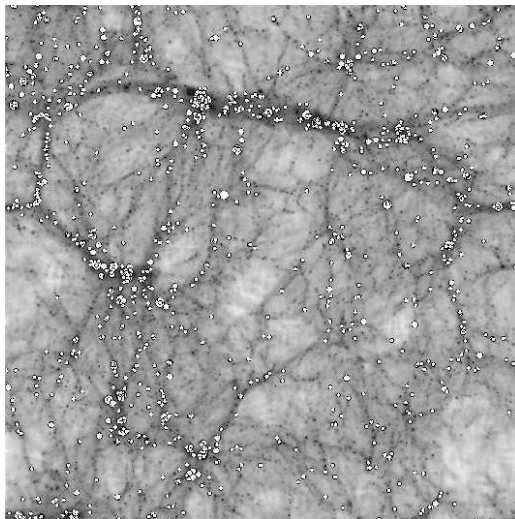


FIG. 4 – Coupe d'une simulation à $z = 0$: la densité de matière noire est représentée par une échelle de gris, tandis que les cercles blancs indiquent les positions des galaxies, leur taille dépendant de la luminosité (mesurée sur une bande spectrale bleue B). Seules les galaxies brillantes sont représentées[8].

3 La bimodalité des galaxies

3.1 Bimodalité de la distribution des galaxies

Les observations révèlent une bimodalité dans la distribution des galaxies autour d'une masse stellaire caractéristique $M_{s,crit} \approx 3 \cdot 10^{10} M_{\odot}$. La distribution est divisée en deux classes : les séquences « bleue » et « rouge », dont les domaines sont quasiment disjoints. La séquence rouge correspond aux galaxies elliptiques, la séquence bleue aux galaxies spirales.

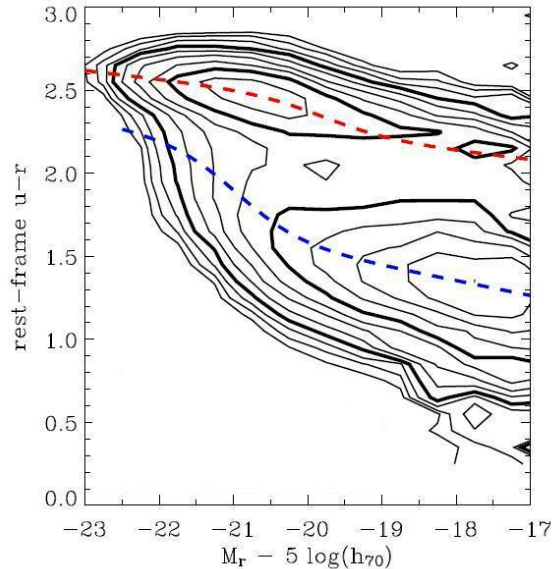


FIG. 5 – Distribution couleur-magnitude obtenue à partir d'un relevé de 62 726 galaxies de SDSS. Les contours représentent une échelle logarithmique en densité, doublant à chaque niveau ; les galaxies les plus lumineuses sont à gauche[1].

Au niveau de la luminosité, on observe que les galaxies bleues dominent en deçà de $M_{s,crit}$, tandis que ce sont les galaxies rouges au dessus. Dans le diagramme couleur-magnitude (la magnitude est une mesure logarithmique de la luminosité), les galaxies sont séparées en deux séquences bien distinctes. Tandis que la séquence bleue est assez large, la séquence rouge est plus fine. Cette bimodalité est aussi visible au niveau du taux de formation d'étoiles : les galaxies de masse stellaire inférieure à $M_{s,crit}$ ont une population plus jeune, contrairement aux galaxies plus massives. Cette masse stellaire critique $M_{s,crit}$ correspond à une masse du halo $M_{crit} \leq 10^{12} M_{\odot}$.

3.2 Choc viriel et écoulement de gaz froid

On a longtemps pensé que, lors de la formation des galaxies, le gaz tombant à l'intérieur du halo de matière noire était toujours chauffé jusqu'à la température Viriel du halo. Le gaz s'effondrant au centre du halo, il se crée une onde de choc qui se propage vers l'extérieur : à l'intérieur du choc, le gaz chaud est supporté par la pression dans un équilibre quasi statique. Il se refroidit radiativement et se contracte alors lentement vers un disque où il peut éventuellement former des étoiles. Les physiciens israéliens Yuval Birnboim et Avishai Dekel ont étudié en 2003[2] les conditions d'existence d'un tel choc dans les halos sphériques, en s'appuyant notamment sur des simulations hydrodynamiques. Il s'avère qu'un choc Viriel n'a lieu que dans les grands halos, qui se forment plus tard ; aucun choc Viriel ne se forme dans les halos plus petits, où le refroidissement derrière le choc supprime de manière efficace le support dû à la pression. Ainsi, les halos de masse inférieure à $M_{crit} \approx 10^{12} M_{\odot}$ ne sont pas sujets à un choc Viriel.

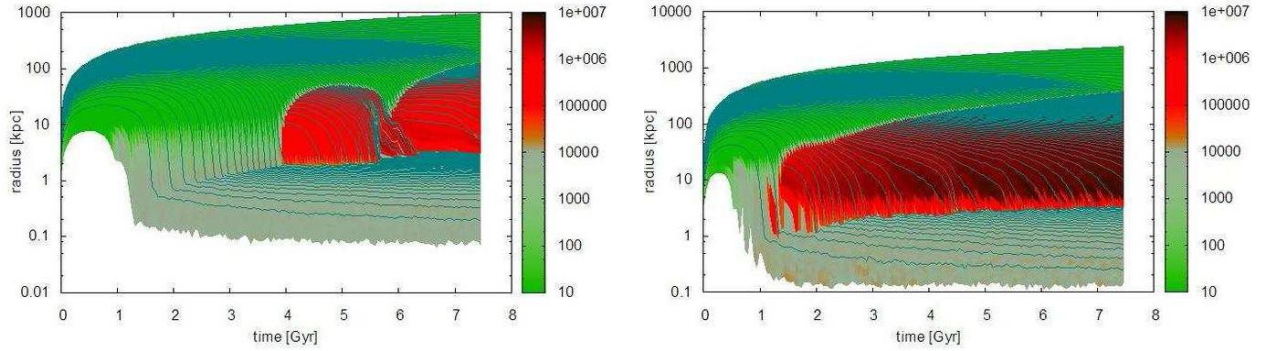


FIG. 6 – Évolution temporelle du rayon de coquilles lagrangiennes de gaz dans la simulation d’une protogalaxie constituée de gaz et de matière noire. Les lignes de la figure représentent les lignes de courant des particules lagrangiennes, tandis que la température est indiquée en couleur. Un choc se manifeste par un brusque changement de direction de ces lignes et correspond aussi à un soudain ralentissement de la chute, ainsi qu’à une augmentation brutale de la température. La limite inférieure où le courant parvient à s’arrêter correspond au rayon du disque formé par la force centrifuge au sein du halo. La figure de droite correspond à un système massif dont la masse virialisée passe de 10^{11} à $10^{13} M_{\odot}$, tandis que la figure de gauche correspond à un système moins massif qui passe de 10^{10} à $10^{12} M_{\odot}$: dans ce deuxième cas, on voit clairement le fait que le choc Viriel n’existe que lorsque le système est plus massif qu’une certaine masse critique[7].

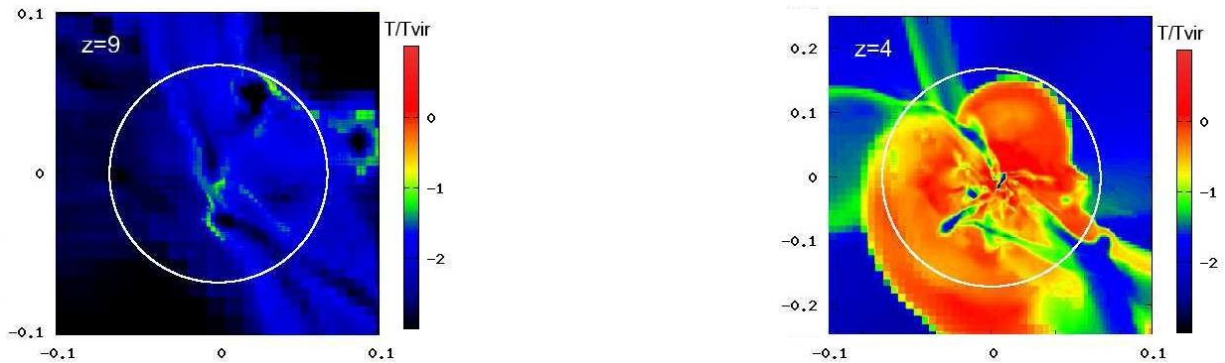


FIG. 7 – Images tirées d’une simulation numérique montrant la température du gaz d’une protogalaxie à deux époques différentes, alors que sa masse est différente. La température est relative à la température Viriel du halo à l’époque considérée. À droite, le halo est déjà massif ($M \approx 3 \cdot 10^{11} M_{\odot}$) : la plupart du gaz est chauffé par un choc important autour du rayon Viriel (cercle blanc). Des écoulements de gaz froid pénètrent néanmoins profondément dans le halo. À gauche, le halo est encore petit ($M \approx 2 \cdot 10^{10} M_{\odot}$) : le gaz n’est pas chauffé à l’intérieur du rayon Viriel[7].

Le processus de refroidissement détermine un certain nombre de propriétés de la galaxie, comme le taux de formation d’étoiles et la quantité d’éléments lourds. Le fait que le gaz soit chauffé à la température Viriel a tendance à inhiber la formation d’étoiles, contrairement au cas où le gaz tombe lentement dans le puits de potentiel du halo. De manière schématique, on peut considérer que pour des halos de masse $M < M_{crit}$, c’est le processus d’écoulement de gaz froid (*cold flows*) qui domine, avec formation d’étoiles, tandis que pour $M > M_{crit}$, il existe un choc Viriel (*Virial shock*) qui empêche la formation d’étoiles.

3.3 Explication de la bimodalité

L’introduction de manière *ad hoc* d’une masse critique M_{crit} dans les simulations au delà de laquelle il n’y a plus formation d’étoiles permet de faire sortir la bimodalité des simulations, ce que ne permettaient pas les autres modèles. Il reste à trouver une explication physique à cette hypothèse : celle-ci se trouve dans la compétition entre les écoulements de gaz froids et le choc Viriel[7].

Il est désormais possible de proposer un scénario qui expliquerait la bimodalité. Dans celui-ci, les collisions des écoulements de gaz froids les uns avec les autres et avec le disque intérieur du halo seraient à l'origine d'un processus de formation d'étoiles (analogue aux collisions des disques gazeux ou des nuages). On fait de plus l'hypothèse qu'une fois chauffé à la température Viriel, le gaz demeure chaud, compte tenu du long temps nécessaire à son refroidissement et à sa vulnérabilité aux effets de *feedback* des noyaux actifs de galaxies (les gaz froids y sont moins sensibles). La séquence bleue est dominée par des galaxies situées dans des halos de masse inférieure à M_{crit} : des écoulements de gaz froids mènent à la formation assez rapide d'un disque et d'étoiles au sein de celui-ci. Certaines galaxies continuent à recevoir un apport en gaz froid, quand bien même leur masse est au-delà de M_{crit} , c'est pourquoi la séquence bleue ne s'arrête pas brutalement au niveau de M_{crit} . Lorsqu'un halo est plus massif que M_{crit} , le gaz est chauffé par un choc Viriel : il est plus vulnérable au *feedback* ; la croissance du disque et la formation d'étoiles sont inhibées (voire stoppées s'il n'y a pas de gaz froid résiduel). Autour des galaxies centrales, les galaxies satellites, moins massives, subissent des effets similaires : dans des halos de masse inférieure à M_{crit} , l'accrétion jusqu'aux galaxies satellites peut les maintenir sur la séquence bleue, tandis que dans des halos de masse supérieure à M_{crit} , l'apport de gaz s'arrête et la densité autour du halo est grande, ce qui permet aux satellites de devenir rouges eux aussi.

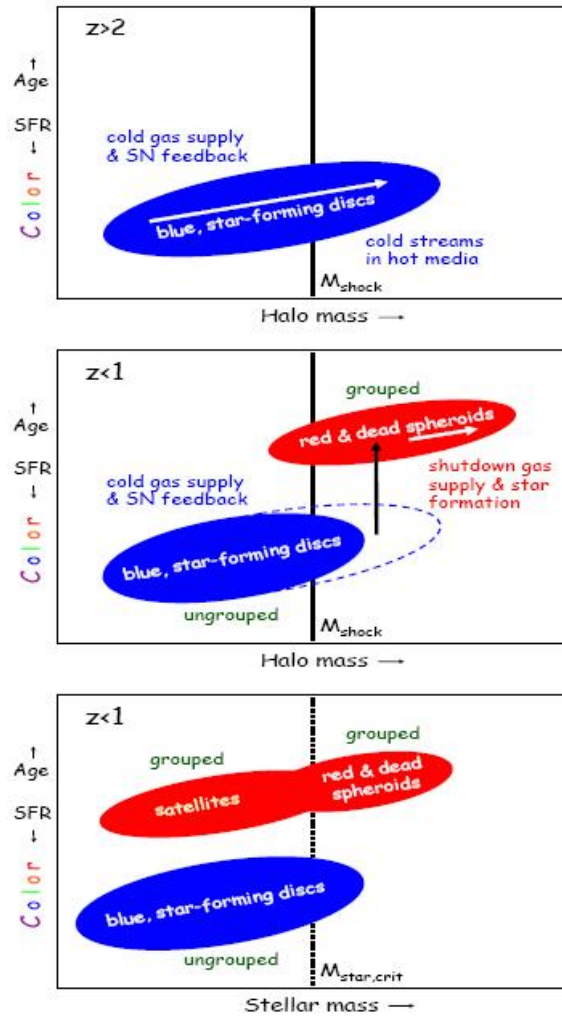


FIG. 8 – Schéma illustrant l'origine de la bimodalité en couleur (ou en formation d'étoiles -*SFR*-, ou en âge)[7].

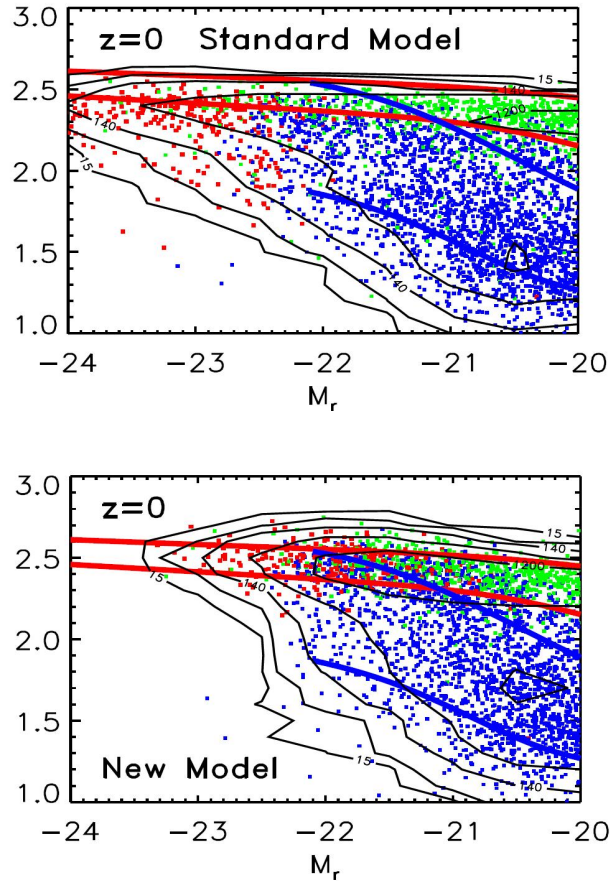


FIG. 9 – Distribution couleur-magnitude obtenue grâce à la méthode de simulation semi-analytique GalICS : le nouveau scénario introduisant une masse critique $M_{crit} \approx 10^{12} M_{\odot}$ permet de reproduire les caractéristiques de la distribution bimodale observée par le catalogue SDSS. En haut, diagramme avec une version traditionnelle de GalICS ; en bas, avec le nouveau scénario[7].

Le problème de la bimodalité des galaxies permet de voir deux aspects de l’usage des simulations numériques en cosmologie. Après avoir observé la distribution bimodale des galaxies, on a tenté d’ajuster les paramètres des simulations pour la retrouver, d’où l’introduction d’une masse critique au-delà de laquelle la formation d’étoiles serait inhibée. La nécessité de cet ajustement a indiqué dans quelle direction chercher pour expliquer de manière phénoménologique la bimodalité. Les études de stabilité du choc Viriel s’appuient elle-mêmes sur des simulations, qui s’apparentent elles à des données expérimentales, permettant de valider ou d’infirmer une théorie. Ainsi, d’un côté, la modification des codes d’une simulation numérique permet de mieux comprendre les phénomènes qui entrent en jeu, et de l’autre, les résultats des simulations peuvent tester les théories que l’on développe. Il est donc normal que les simulations numériques jouent un rôle primordial dans la compréhension de problèmes comme la formation des galaxies, où les équations ne peuvent être résolues analytiquement et où entrent en jeu une multitude de phénomènes divers. Au sein de ces simulations, il est néanmoins toujours nécessaire de décrire certains phénomènes (*feedback*, formation d’étoiles,...) de manière phénoménologique dans le cadre de modèles semi-analytiques, comme GalICS.

Références

- [1] Baldry I. K. , Balogh M. L., Bower R., Glazebrook K. and Nichol R. C., *Color bimodality : Implications for galaxy evolution*, The New Cosmology : Conference on Strings and Cosmology ; The Mitchell Symposium on Observational Cosmology, Proceedings of the conferences held 14-17 March ; 12-16 April 2004 in College Station, Texas (USA). AIP Conference Proceedings, Volume 743. New York : American Institute of Physics, p.106-119, 2004
- [2] Birnboim Yuval, Dekel Avishai, *Virial shocks in galactic haloes ?*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 345, Issue 3, pp. 349-364, 2003
- [3] Bouquet Alain, *L'inflation de l'Univers*, in dossier Pour la Science 45 « L'Histoire de l'Univers », octobre/décembre 2004
- [4] Bouquet Alain, Monnier Emmanuel, *Matière Noire et autres cachoteries de l'Univers*, Dunod, 2003
- [5] Cline David, *Le coté obscur de la matière*, in dossier Pour la Science 45 « L'Histoire de l'Univers », octobre/décembre 2004
- [6] Combes Françoise, Boissé Patrick, Mazure Alain, Blanchard Alain, *Galaxies et Cosmologie*, InterEditions/Éditions du CNRS, chap. XII, 1991, pp.371-395
- [7] Dekel Avishai, Birnboim Yuval, *Galaxy bimodality due to cold flows and shock heating*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 368, Issue 1, pp. 2-20, 2005
- [8] Hatton Steve, Devriendt Julien E. G., Ninin Stéphane, Bouchet François R., Guiderdoni Bruno, and Vibert Didier, *GALICS I. A hybrid N-body/semi-analytic model of hierarchical galaxy formation*, MNRAS 343, 75-106, 2003
- [9] Lachièze-Rey Marc, *Initiation à la Cosmologie*, éd. Masson, 1992
- [10] Lachièze-Rey Marc, *La Cosmologie, un bilan entre deux siècles*, in dossier Pour la Science 45 « L'Histoire de l'Univers », octobre/décembre 2004
- [11] Lagache Guilaine, Guiderdoni Bruno, *L'infrarouge dévoile les galaxies*, , in dossier Pour la Science 56 « Galaxies : Fenêtres sur l'univers », juillet/septembre 2007
- [12] Lanzoni B., Guiderdoni B., Mamon G. A., Devriendt J. and Hatton S., *GALICS VI. Modelling hierarchical galaxy formation in clusters*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 361, Issue 2, pp. 369-384, 2005
- [13] Mamon Gary A., *La matière noire dans l'Univers*, magazine l'Astronomie, vol. 120, p. 602, décembre 2006
- [14] Milgrom Mordechai, *La matière noire existe-t-elle vraiment ?*, in dossier Pour la Science 45 « L'Histoire de l'Univers », octobre/décembre 2004
- [15] Milgrom Mordechai, *The MOND paradigm*, 2008, communication privée
- [16] Peacock John A., *Cosmological Physics*, Cambridge University Press, 1999, chap. 15, pp.457-494
- [17] Peebles P. J. E., *Principles of Physical Cosmology*, Princeton University Press, 1993, pp. 528-534 et pp. 608-622
- [18] Riess Adam G. et al., *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant*, Astronomical Journal, 116, 1009-1038, 1998
- [19] White Simon D. M., *Formation and Evolution of Galaxies : Lectures given at Les Houches, August 1993*, in Cosmology and Large Scale Structure : Les Houches Session LX (ed. R. Schaeffer, J. Silk, M. Spiro and J. Zinn-Justin), North Holland, p 349, 1996
- [20] White, S. D. M., Rees, M. J., *Core condensation in heavy halos - A two-stage theory for galaxy formation and clustering*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 183, p. 341-358, May 1978