

Une étude de l'Univers Local: Les grandes étapes d'un programme

Gilles Theureau

Astronome Adjoint à l'Observatoire de Paris

et au Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement à Orléans

Résumé : Voici la première partie de la conférence de l'Assemblée Générale du CLEA tenue à Orléans en novembre 2002. La seconde partie sera publiée dans le prochain cahier n° 105. Ces articles nous font découvrir les derniers résultats concernant la cartographie et la cinématique de l'Univers Local.

Mots-clefs :

ARTICLE DE FOND - GALAXIE - UNIVERS - CINEMATIQUE

Introduction

Le but de cette conférence était de donner une description générale de ce que l'on nomme communément l'Univers Local et de retracer le travail d'une équipe dans ce domaine, sur plus de trente ans de recherche. Cette équipe est celle de trois personnages bien connus du CLEA : Lucette Bottinelli, Lucienne Gouguenheim et Georges Paturel, et c'est aussi la mienne puisque j'y ai effectué ma thèse entre 1994 et 1997 et ai continué à y travailler depuis...

La définition de l'Univers Local est quelque chose d'assez subjectif qui dépend des auteurs et des moyens observationnels disponibles à une époque donnée. On peut cependant affirmer qu'il s'agit à la fois d'un univers contemporain où les effets d'évolution dus au « look-back time » (regard vers le passé) ne se font pas sentir et d'un univers de galaxies en trois dimensions pour lesquelles nous possédons des observations complètes sur tout le ciel. Enfin, c'est un univers très hétérogène composé d'une grande variété de structures : galaxies, groupes, amas, superamas, grands vides, bulles et filaments...

Etudier l'Univers Local implique donc de décrire à la fois le contenu et la structure de l'univers proche à partir d'un grand nombre d'observations complémentaires.

Il s'agit d'une part, du point de vue de la physique des galaxies :

- d'étudier la formation et l'évolution des populations stellaires (couleurs, métallicités, âges, flambées d'étoiles...), le milieu interstellaire (gaz, poussières, matière noire) et les effets de l'extinction,
- d'étudier la morphologie des galaxies, leur dynamique interne et leur masse en fonction de leur environnement (intérieur/extérieur aux amas)
- d'étudier le milieu intergalactique et interamas,
- d'étudier enfin la formation et l'évolution des galaxies et des grandes structures.

Il s'agit d'autre part, d'un point de vue cosmologique :

- d'étudier les différents groupements ou associations gravitationnelles de galaxies, des paires jusqu'aux amas riches, et leur statistique,
- d'étudier la dynamique des galaxies dans les amas et au voisinage des grandes structures,
- de mesurer le taux d'expansion de l'Univers,

- d'étudier le rapport masse noire/lumineuse aux différentes échelles et la distribution de la masse totale à partir des mouvements observés.

Les Observations

De quels types d'observations disposons-nous ?

Tout d'abord des grands relevés photométriques... Les premiers grands relevés photographiques exhaustifs ont été les « surveys » du mont Palomar (USA, 1950-55) et de Siding Spring (Australie, 1974-92) qui ont notamment couvert l'ensemble du ciel en bande B ($\lambda \sim 440$ nm) jusqu'à une brillance superficielle de $25 \text{ mag.arcsec}^{-2}$. Les plaques de Schmidt ($6,5^\circ \times 6,5^\circ$) ont été depuis digitalisées (DSS : Digitalized Sky Survey) et ont permis d'extraire un catalogue de 2,7 millions de galaxies. Le sondage infrarouge du satellite IRAS (lancé en 1983) a permis de construire quant à lui une liste de 250 000 sources ponctuelles, dont un grand nombre de galaxies sur la base de cartes aux longueurs d'onde 12, 25, 60 et 100 μm . Même s'il est moins profond, ce catalogue est très homogène sur l'ensemble de la sphère céleste, en particulier jusqu'aux très basses latitudes galactiques, le rayonnement infrarouge étant très peu absorbé par le gaz ou les poussières du milieu interstellaire. Le flux infrarouge est par ailleurs un meilleur traceur de la masse totale d'une galaxie que le rayonnement optique et les effets de sélection sont moins importants. Ceci a permis une représentation de la distribution de la masse dans notre univers proche meilleure, par exemple, que celle obtenue avec les sondages photographiques ci-dessus.

Plus récemment (1996-2002), les grands relevés numériques CCD DENIS et 2MASS en optique (800 nm) et infrarouge proche (1,2 ; 1,6 et 2,5 μm) ont permis d'extraire des catalogues de 500 000 à 1,5 millions de galaxies sur respectivement le ciel Sud et l'ensemble de la sphère céleste. Ces relevés, bien qu'ils soient moins profonds que les relevés photographiques, ont l'avantage d'être beaucoup plus homogènes, de permettre d'extraire des magnitudes plus précises et d'avoir une réponse linéaire du récepteur contrairement à l'émulsion argentique (ce qui

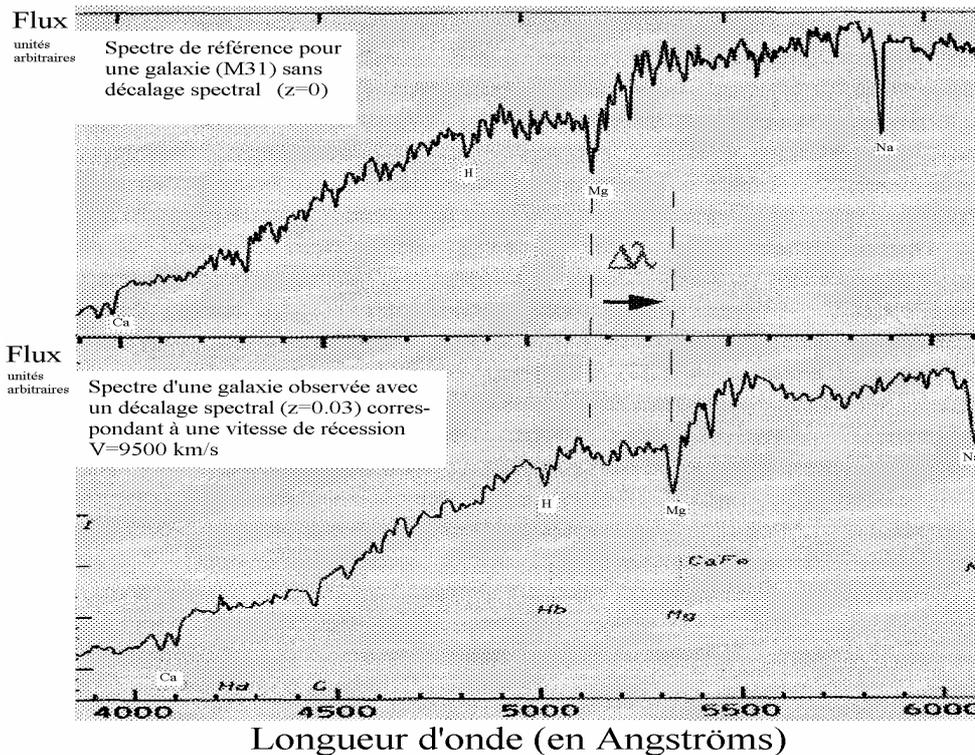
permet réellement de travailler sur les profils photométriques et les couleurs des objets).

Les données de photométrie et d'imagerie permettent d'étudier la morphologie des galaxies, les effets d'environnement (champ/amas), la forme de la distribution de la luminosité (2D) à l'intérieur des galaxies, les variations de couleur et de métallicité qui reflètent l'histoire de leurs populations stellaires, et enfin la fonction de luminosité des galaxies elles-mêmes (en particulier dans les amas sachant que toutes ces galaxies sont situées à la même distance de nous).

Les sondages spectroscopiques sont une autre grande famille de données. Ils apportent notamment la troisième dimension à travers la loi de Hubble (voir plus loin), mais aussi la mesure des paramètres physiques des galaxies comme leur masse, leur taille ou leur luminosité intrinsèque, alors que la photométrie nous donne une vue essentiellement qualitative et bidimensionnelle de notre Univers. S'ajoute à ceci un mode de classification supplémentaire, basé sur les intensités relatives des raies d'émission (et/ou d'absorption) observées dans le spectre et qui reflète les différences de populations stellaires ou de contenu gazeux d'une galaxie à l'autre.

Rappelons que le redshift, ou décalage vers le rouge, d'une galaxie correspond au décalage Doppler-Fizeau du spectre de la galaxie par rapport à un spectre obtenu en laboratoire. Le décalage relatif de longueur d'onde que l'on mesure est proportionnel à la vitesse de l'observateur par rapport à la source lumineuse (le long de la ligne de visée). Il traduit donc une vitesse radiale d'éloignement ou de rapprochement. L'univers étant par ailleurs en expansion on observe essentiellement des décalages vers les grandes longueurs d'onde, donc « vers le rouge ». Et cette expansion étant proportionnelle à la distance (du moins à l'échelle qui nous intéresse ici), on a finalement la relation :

$$z = v/c = \Delta\lambda/\lambda$$

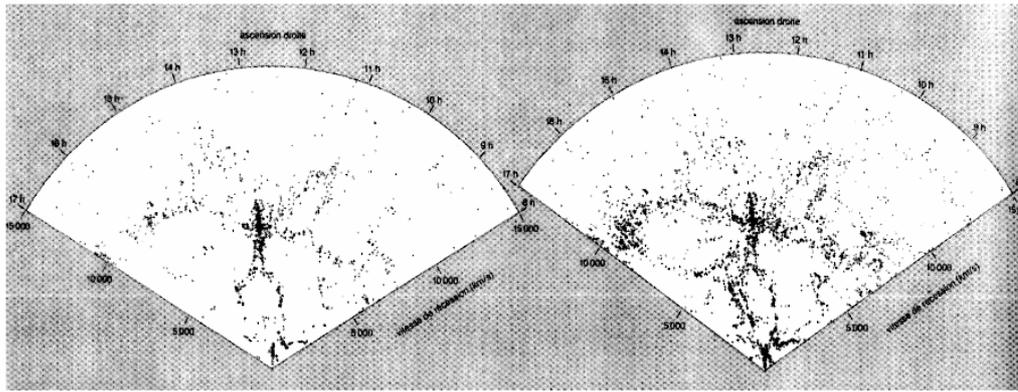


où c est la vitesse de la lumière (300 000 km/s), $\Delta\lambda$ est le décalage spectral observé, V est la vitesse radiale de la galaxie, et H_0 est la constante de Hubble et représente le taux d'expansion de l'Univers.

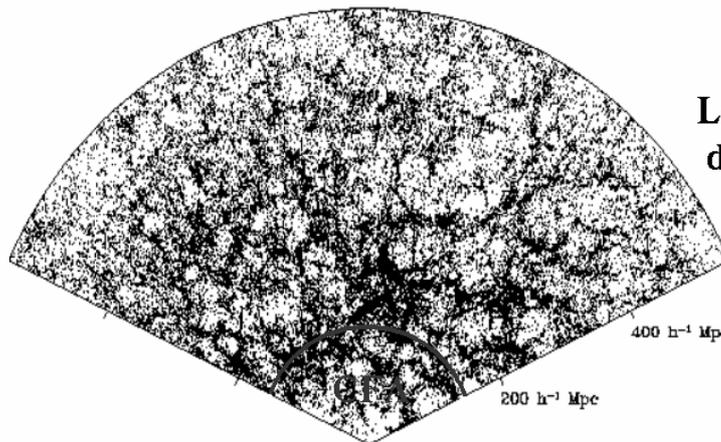
A travers cette loi de Hubble, la mesure du redshift nous donne bien une mesure approximative de la distance de la galaxie. On a donc accès à la distribution spatiale en trois dimensions des galaxies. C'est le CFA, un premier relevé systématique de 2400 galaxies sur environ 20% du ciel qui a révélé en 1985 l'existence des grandes structures, montrant qu'à cette échelle (pour des vitesses inférieures à 15 000 km/s ou des distances inférieures à ~ 200 Mpc) l'Univers est encore très hétérogène, constitué d'amas, de murs, de filaments et de grand vides. Il y a eu depuis plusieurs grands sondages qui confirment ce résultat et ont même repoussé l'échelle de l'homogénéité au delà de 500 Mpc. Les plus importants sont le IRAS PSCz (IRAS Point Source Catalogue, 15 000 mesures sur 83 % du ciel), le LCRS (Las Campanas Redshift Survey,

25 000 mesures sur 1,7 % du ciel), Le 2dF (2 Degree Field, 250 000 galaxies sur 4,7% du ciel), le 6dF (6 Degree Field, 100 000 galaxies sur 50 % du ciel) et le SDSS (Sloan Digital Redshift Survey, 1 million de galaxies sur 25 % du ciel).

Au-delà de l'étude de la distribution spatiale des galaxies et l'étude de grandes structures, les catalogues de redshifts permettent l'étude de la fonction de corrélation spatiale des galaxies et du spectre de puissance, c'est à dire la façon dont s'organise et se hiérarchise la distribution de la matière lumineuse aux différentes échelles. Cela apporte en particulier des contraintes sur les modèles cosmologiques et la formation des structures. Les mesures spectrales permettent en outre une première mesure de la constante de Hubble à partir des diagrammes magnitude/redshift, une meilleure discrimination entre les galaxies d'amas et les galaxies de champ, une étude de la cinématique interne des amas et des groupes, et donc de leur masse dynamique, et enfin une étude quantitative de la fonction de luminosité des galaxies.



CfA (1985)
2400 galaxies



Les grands sondages de redshifts

SLOAN (2003)
un million de galaxies

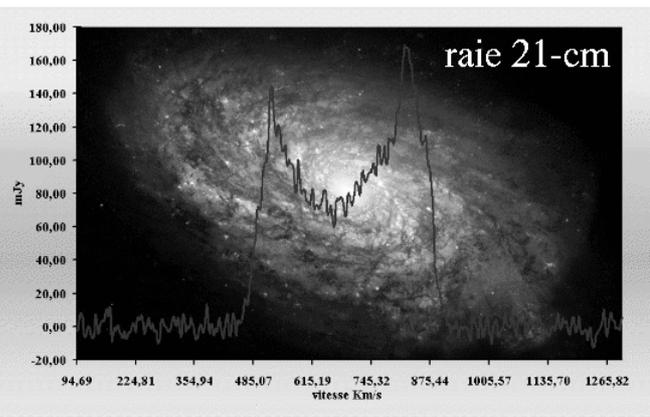
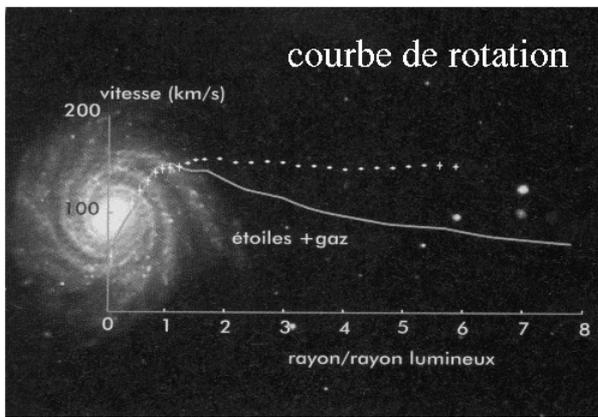
La dernière grande catégorie d'observations concerne les mesures de cinématique interne des galaxies qui nous permettent non seulement d'évaluer leur masse réelle mais aussi nous fournissent un indicateur de distance indépendant du redshift. Les deux « relations d'échelle » principales utilisées sont les relations de Tully-Fisher pour les galaxies spirales et de Faber-Jackson ou du Plan Fondamental pour les galaxies elliptiques. Toutes deux sont des relations masse-luminosité qui lient la masse dynamique, mesurée à partir des mouvements internes, à la luminosité intrinsèque des objets. Dans le cas des galaxies spirales, on mesure la vitesse de rotation du gaz dans le disque à partir de mesures spectroscopiques optiques (principalement la raie d'émission [H α], mais aussi [H β] ou [OIII] pour les plus petites longueurs d'onde ou les galaxies très décalées vers le rouge) ainsi que les mesures radio (la raie 21-cm de l'hydrogène neutre). On obtient alors soit une courbe de rotation, du centre au bord de la galaxie (optique ou interférométrie radio), soit directement la vitesse maximale de rotation à partir de l'élargissement de la raie observée (mesure radio avec une antenne unique).

Dans le cas des galaxies elliptiques ou lenticulaires, on mesure l'élargissement de certaines raies d'absorption pour en déduire la dispersion de vitesse des étoiles au coeur des galaxies (dans un rayon de ~ 400 pc). Ces mesures sont très délicates car il faut pouvoir séparer l'élargissement provenant des mouvements des étoiles dans la galaxie, de l'élargissement provoqué par la rotation ou les turbulences dans les enveloppes des étoiles elles-mêmes. Les mesures de rotation maximale V_{\max} ou de dispersion de vitesses centrale σ_v sont directement liées à la masse totale des galaxies considérées et donc à leur luminosité totale si l'on suppose que les étoiles représentent une partie relativement constante de cette masse. On obtient ainsi les relations suivantes :

$$M = a \log V_{\max} + b$$

$$M = a' \log \sigma_v + b'$$

$$\log r_e = \alpha \log \sigma_v + \beta m_e + \gamma$$



où M est la magnitude absolue de la galaxie (proportionnelle au logarithme de la luminosité totale), r_e et m_e sont respectivement le rayon effectif et la brillance effective, deux paramètres qui décrivent la forme de la distribution de la luminosité (ou de la distribution des étoiles) du centre jusqu'au bord de la galaxie. L'étude de ces relations et du rapport masse/luminosité en fonction de la morphologie, de la présence de barre ou d'anneau par exemple, ou encore de l'environnement, nous permettent de mieux comprendre la formation et l'évolution des galaxies, ainsi que leur contenu en matière noire. Couplées à des mesures photométriques de taille ou d'éclat apparent, elles permettent une mesure de la distance de ces galaxies : on mesure V_{\max} ou σ_v , on devine la magnitude M (ou le diamètre absolu) à partir d'une des relations ci-dessus, on mesure la magnitude apparente m (ou le diamètre apparent) à partir d'un relevé optique, et on en déduit la distance d , en Mpc, par la relation :
 $m - M = 5 \log d + 25$
 (Respectivement $d = D_{\text{abs}}/D_{\text{app}}$, si l'on se base sur les diamètres absolus (Mpc) et apparents (rad)).

Ces observations, qualifiées souvent de « mesures 4D », permettent donc d'acquérir des distances et ainsi :

- 1) de mesurer le taux d'expansion de l'Univers H_0 par la relation $cz = V_{\text{obs}} \sim H_0 \cdot d$
- 2) de mesurer le champ des vitesses particulières des galaxies qui se superpose à l'expansion cosmologique et reflète les hétérogénéités de la distribution de la matière ($V_{\text{obs}} = H_0 \cdot d + V_{\text{part}}$)
- 3) de mesurer la distribution de densité de la masse totale aux différentes échelles
- 4) de mesurer le paramètre de densité de l'Univers Ω_m (rapport de la densité de matière observée et de la densité critique qui sépare un univers ouvert, en perpétuelle expansion et dilution, d'un Univers

fermé, dont la densité finira par l'emporter sur l'expansion et le contraindra un jour à se recontracter)

5) et enfin d'évaluer l'âge de l'Univers dans le cadre d'un modèle.

Glossaire :

Survey : Ce mot anglais désigne une série d'observations couvrant systématiquement toute une région du ciel. En français on dit "un relevé".

Redshift : Décalage vers les grandes longueurs d'onde du spectre lumineux. On le désigne souvent par la lettre $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$. Si on interprète ce décalage comme résultant d'une vitesse (effet Doppler-Fizeau) la relation entre la vitesse V et z est (c étant la vitesse de la lumière dans le vide):

$$V = cz$$

Cependant quand le décalage est grand et que l'on atteint des vitesses relativistes (non négligeables devant c) alors la relation plus générale est:

$$V = c \cdot [a^2 - 1] / [a^2 + 1]$$

où $a = 1 + z$.

Métallicité : Proportion relative d'un astre en atomes plus lourds que l'hélium. Si on note X la proportion relative en hydrogène, Y la proportion relative en hélium et Z la métallicité, on a la relation:

$$X + Y + Z = 1.$$

Pour une étoile, une forte métallicité est en général le signe d'un état évolutif avancé.

Unité : mag.arcsec⁻² Cette unité est utilisée pour exprimer, en magnitude, ce qu'on appelle la brillance (luminance en physique) d'une source étendue (flux par unité de surface apparente exprimée en arcsec²). C'est donc l'unité de la quantité :

$$-2,5 \log (\text{flux/surface apparente}).$$

Les *arcsec* sont les secondes de degré.