

Nom _____ Groupe _____ Date _____

Partenaire _____

Laboratoire No 9

La Loi de Hubble

Étude de texte

No 1 Quel type d'objets nébuleux posèrent le plus de difficultés aux astronomes ?

No 2 Quel philosophe avança, dès 1755, l'existence des univers-îles ?

No 3. Quel était le diamètre de notre Galaxie proposé par :

a) Harlow Shapley : _____ parsecs

b) Heber Curtis : _____ parsecs

No 4 Quelle classe d'étoiles utilisa *Shapley* comme *indicateurs* de distance ?

No 5 Précisez les étapes, utilisées par Hubble, pour calculer la distance de la galaxie d'Andromède.

No 6 Quelle est la distance, admise aujourd'hui, nous séparant de la galaxie d'Andromède ?

No 7 Quel est le résultat « *étonnant* » des observations de Slipher ?

No 8 Quel instrument a permis à Milton Humason d'obtenir plus rapidement un bon spectre ?

No 9 Quelle règle très précise, Hubble a-t-il obtenu en comparant ses résultats sur les distances et ceux de Humanson sur les vitesses des galaxies?

No 10 Le décalage spectral vers le rouge représente-t-il un déplacement véritable des galaxies ?

No 11 Que représente l'inverse de la pente de la droite obtenue par Hubble ?

No 12 Les mesures de l'âge des roches terrestres sont-elles en accord avec l'estimation de l'âge de l'Univers obtenu en utilisant la constante obtenue par Hubble ?

No 13 Citez les deux erreurs majeures commises par Hubble :

No 14 En vous basant sur mon sentiment personnel, quelle valeur pouvons-nous donner aujourd'hui à la constante de Hubble ?

No 15 Énumérez trois preuves observationnelles favorisant la théorie du Big bang.

1)

2)

3)

No 16 Sommes-nous justifiés d'attribuer à *Hubble*, et à lui seul, la découverte de l'expansion de l'Univers. Précisez votre réponse.

La Loi de Hubble



Edwin HUBBLE, aux commandes du télescope de Schmidt à l'observatoire du Mont Palomar.

Le point de départ

Grâce aux progrès constants dans les moyens d'observation du ciel, les astronomes du XVIIIe siècle se rendirent compte qu'il existait de nombreux objets diffus, de nature non stellaire, qu'ils baptisèrent du nom de nébuleuses. À cette époque, l'astronome français Charles Messier établit une liste d'une centaine de ces objets. Il leur donna des noms bien connus, comme par exemple M31 pour la galaxie d'Andromède. Au XIXe siècle, William Herschel et son fils établirent une liste de plus de 5000 objets qui devint plus tard le fameux Nouveau Catalogue Général, dans lequel la même galaxie d'Andromède se nomme NGC 224.

Nous savons de nos jours que ces nébuleuses ne sont pas toutes des objets de même nature, mais peuvent être classées en différents groupes. On trouve ainsi de simples amas d'étoiles ou bien des nuages de gaz, mais aussi des objets extérieurs à la Galaxie. Ce sont ces derniers qui posèrent le plus de difficultés aux astronomes et qui nous intéressent ici. Le philosophe allemand Emmanuel Kant, qui fut l'un des premiers à réaliser la véritable nature de la Voie Lactée, avança en 1755 que ces nébuleuses étranges étaient d'énormes regroupements d'étoiles, de nature semblable à la Galaxie et situés bien au-delà des limites de celle-ci. Il les appela des univers-îles. Plus tard, en 1845, Lord Rosse commença l'étude de ces nébuleuses à l'aide d'un télescope de 1,60 mètres qui venait juste d'être achevé. Il fut alors en mesure d'observer dans certaines d'entre elles une structure spirale très nette et en déduisit que ces objets étaient des systèmes d'étoiles à part entière, distincts de la Voie Lactée.

Shapley contre Curtis

Au début du XXe siècle, la communauté astronomique était divisée en deux camps, pour ou contre l'hypothèse des univers-îles. En 1920 eut lieu un célèbre débat à Washington, où s'affrontèrent les champions des deux camps. D'un côté, on trouvait Harlow Shapley qui avançait que la Galaxie était énorme, d'un diamètre de 100 000 parsecs, ce qui l'incitait à penser que les nébuleuses spirales étaient des objets gazeux contenus dans notre Galaxie même. En effet, les mesures de distance de l'époque indiquaient que les Nuages de Magellan se trouvaient aux limites de la Galaxie et en faisaient donc encore partie. Nous savons aujourd'hui que leur distance est en fait le double du diamètre de la Galaxie, mais, étant donné les incertitudes des mesures de l'époque, le doute était permis.

Dans l'autre camp, le chef de file était Heber Curtis, qui ne croyait pas à la description de la Voie Lactée par Harlow Shapley et remettait en cause la méthode des céphéides. Il pensait que la Galaxie était relativement petite, d'environ 10 000 parsecs de diamètre et que les nébuleuses étaient d'autres galaxies situées loin de la nôtre. Il s'appuyait en particulier sur des observations de ce qui semblait être des supernovae dans ces galaxies. Ces observations montraient que les nébuleuses étaient effectivement formées d'étoiles, mais aussi qu'elles étaient très lointaines étant donné la faible luminosité apparente des explosions. Mais le débat de 1920 ne régla rien, aucun des participants n'étant en mesure d'apporter un argument vraiment déterminant.

Edwin Hubble

En 1917 fut inauguré le télescope de 2,50 mètres du mont Wilson en Californie. Avec cet instrument, Edwin Hubble se mit à étudier la nébuleuse d'Andromède et en particulier ses parties externes. Il se rendit alors compte que ses plaques photographiques faisaient apparaître des myriades d'étoiles très faibles là où ses prédécesseurs n'avaient vu que des taches diffuses. La nébuleuse était enfin résolue en ses constituants et révélait sa vraie nature. Hubble examina un grand nombre de plaques et constata que quelques dizaines de céphéides y étaient visibles, ce qui lui donnait la possibilité d'utiliser la méthode d'Harlow Shapley. Il mesura ainsi les périodes et les luminosités apparentes des céphéides, calcula les luminosités intrinsèques grâce aux périodes, puis, utilisant les luminosités apparentes, il détermina la distance à ces étoiles. Il calcula ainsi en 1923 que la galaxie d'Andromède se situait à environ 300 000 parsecs de nous, clairement au-delà des limites de la Galaxie. Nous savons aujourd'hui, que la valeur réelle est de 700 000 parsecs, la différence étant due au fait qu'il existe deux types de céphéides dont les propriétés sont légèrement différentes. Le résultat de Hubble était néanmoins correct qualitativement. Il prouvait que les nébuleuses étaient bien des ensembles d'étoiles à part, d'autres galaxies semblables à la Voie Lactée. Une fois de plus, l'univers nous déniait toute place centrale et nous nous retrouvions sur l'une des planètes d'une étoile anonyme dans un endroit quelconque d'une galaxie comme les autres.

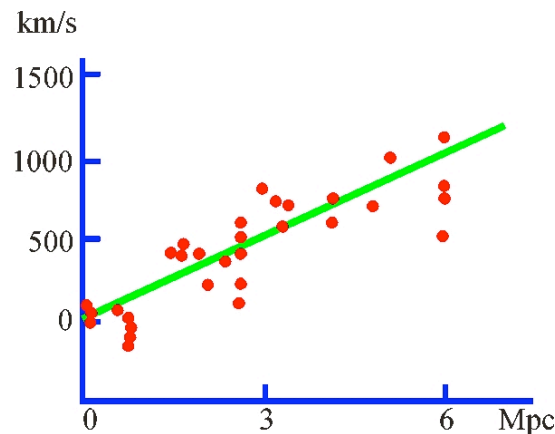
La récession des galaxies

En 1912, l'astronome américain Vesto Slipher commença à l'observatoire Lowell une étude du spectre des galaxies les plus brillantes. Ceci n'était pas une mince affaire car même les galaxies les plus lumineuses ont une luminosité totale très faible et le fait de décomposer la lumière en ses différentes longueurs d'onde n'arrangeait rien. Il fallait ainsi plusieurs nuits d'observation à l'époque pour obtenir le spectre d'une seule galaxie. En analysant ses résultats, Vesto Slipher constata que les quelques raies présentes dans les spectres se trouvaient déplacées par rapport à leur position théorique, ce qu'il interpréta comme un effet de la vitesse des galaxies. En effet les raies spectrales d'un objet changent légèrement de longueur d'onde lorsque le corps est en mouvement. D'après le décalage, Slipher pouvait donc déterminer la vitesse relative de ces galaxies par rapport à la nôtre. Il trouva ainsi par exemple que la galaxie d'Andromède se rapprochait de nous à une vitesse de l'ordre de 300 kilomètres par seconde.

Mais son résultat final était plus étonnant : il obtenait 11 décalages vers le rouge et quatre vers le bleu, soit beaucoup plus de galaxies s'éloignant de nous que de galaxies se rapprochant de nous. Ce résultat était très étrange. En effet, si les mouvements des galaxies se faisaient de façon aléatoire et sans direction privilégiée, il y aurait dû y avoir autant de décalages vers le bleu que vers le rouge. Les observations de Slipher avaient donc une signification profonde et devaient nous apprendre quelque chose de fondamental sur la dynamique de l'Univers. La révélation n'eut cependant pas lieu à ce moment car l'échantillon de galaxies n'était pas suffisamment grand pour être vraiment significatif.

En 1917 s'acheva la construction du télescope de 2,50 mètres du mont Wilson. Ceci permit à un autre américain, Milton Humason, de se mettre au travail sur le même sujet avec plus d'efficacité et une vitesse accrue. En effet, le pouvoir collecteur, c'est-à-dire la quantité de lumière collectée par un instrument, augmente avec la surface de l'ouverture du télescope, si bien que l'on obtient beaucoup plus rapidement un bon spectre avec un grand télescope qu'avec un petit.

A la même époque, Edwin Hubble, dans le même observatoire, continuait ses travaux sur les distances aux galaxies proches en utilisant la relation entre période et luminosité des céphéides. C'est en comparant ses résultats sur les distances et ceux de Milton Humason sur les vitesses, qu'il fit la découverte qui allait révolutionner l'astronomie. Il constata qu'en ne tenant pas compte des galaxies les plus proches, qui se déplaçaient de manière plus ou moins aléatoire, il apparaissait que toutes les galaxies s'éloignaient de nous. De plus, ceci se faisait en suivant une règle très précise : la vitesse de récession d'une galaxie était proportionnelle à sa distance à la Voie Lactée. Ainsi, une galaxie deux fois plus éloignée qu'une autre, s'éloignait deux fois plus vite, une propriété maintenant connue sous le nom de loi de Hubble.



L'expansion de l'univers

La découverte de Hubble fut l'un des grands moments de l'histoire de l'astronomie. La loi de proportionnalité entre distance et vitesse prouvait que la récession des galaxies ne correspondait pas à un mouvement par rapport à un espace statique, mais au contraire à une expansion de l'Univers lui-même. Le décalage vers le rouge était lié à la dilatation de l'espace, pas à un déplacement véritable des galaxies.

L'âge de l'Univers

Cette droite avait une pente d'environ 500 km/s/Mpc, valeur qui changea peu au cours de la dizaine d'années qui suivit. Pourtant, la gamme des décalages vers le rouge explorés par Humason et discutés par Hubble s'élargit énormément. D'emblée, cette valeur de 500 km/s/Mpc parut troublante. S'il fallait interpréter la relation entre distance et décalage vers le rouge comme le signe de l'expansion de l'Univers, l'âge de ce dernier ne pouvait pas être très différent de l'inverse de cette pente, désormais connue comme constante de Hubble. Pour $H_0 = 500$ km/s/Mpc, l'inverse est de 2 milliards d'années. Or, les mesures de l'âge des roches terrestres avaient été entamées dès le début du siècle et dans les années 30, les datations obtenues atteignaient et dépassaient même les 2 milliards d'années!

Deux erreurs majeurs

La première erreur venait des distances estimées par Shapley pour ses variables céphéides. En ignorant l'absorption du rayonnement par les poussières, Shapley avait sous-estimé leur luminosité d'un facteur 4 par rapport à leur intensité réelle. Le problème était encore aggravé par l'existence d'une classe de céphéides plus rares, d'une luminosité proche de celle assignée par Shapley à la catégorie la plus courante.

La seconde grande erreur de Hubble fut de penser que son premier échantillon, composé d'une douzaine de galaxies proches, incluait l'ensemble des luminosités que l'on pourrait trouver dans un échantillon plus large, et que la "luminosité moyenne d'une galaxie" ainsi établie fournirait un étalon fiable. Cette idée est forcément fautive pour n'importe quelle collection d'objets répartis autour d'une luminosité moyenne, cela pour deux raisons. D'abord, lorsque l'on regarde loin, les objets intrinsèquement les moins lumineux deviennent inobservables. On établira donc une moyenne qui sera en fait fondée sur la fraction la plus brillante de la distribution complète. C'est le fameux biais de Malmquist, du nom de l'astronome suédois qui identifia ce problème au cours des années 20. (Rassemblez trois cosmologistes, et vous en aurez au moins un pour penser qu'un des deux autres, au moins, n'a rien compris à ce biais...) Ensuite, un petit échantillon local n'inclura que les types de galaxies les plus communs. Seul un échantillon plus large peut prendre en compte les types de galaxies très brillantes, beaucoup plus rares. Et ces galaxies rares de forte luminosité, qui ne sont même pas représentées dans l'échantillon local, domineront au contraire dans les observations faites à de très grandes distances. C'est pourquoi la "galaxie moyenne" de l'échantillon local de Hubble avait une luminosité à peu près quatre fois plus faible que celle d'un groupe de galaxies plus lointaines et plus variées. Ce biais est appelé effet Scott, d'après l'astronome Elizabeth Scott, qui la première l'a décrit en détail en 1956.

La constante de Hubble aujourd'hui

Depuis la fin des années 50, un grand nombre d'astronomes furent impliqués dans des mesures de distances conduisant à la réévaluation de la constante de Hubble. Il y eut une brève période d'optimisme vers 1960, tous les résultats étant alors à peu près cohérents avec une valeur de 100 km/s/Mpc, soit un âge de l'Univers de 10 milliards d'années (juste assez pour inclure les plus anciennes étoiles connues à l'époque!). Sandage poursuivit son entreprise de révision, parvenant à une valeur de H_0 comprise entre 50 et 55 km/s/Mpc (et à une échelle de temps de 20 milliards d'années), tandis que d'autres chercheurs continuaient à préférer des valeurs supérieures. Mon sentiment personnel est qu'une divergence réelle persiste aujourd'hui, bien que certains estiment que toutes les valeurs de H_0 calculées de bonne foi sont cohérentes avec une valeur intermédiaire de quelque 73 (≈ 10) km/s/Mpc.

Les preuves observationnelles

Nous citerons maintenant trois "succès" du Big Bang, mais il y en a d'autres, comme la prédiction de l'existence de trois et seulement trois espèces de neutrinos et la relativement bonne cohérence de l'âge de l'univers avec celui des plus vieilles étoiles.

- **LE RAYONNEMENT DE FOND DIFFUS COSMOLOGIQUE**

Le Big Bang n'a pas été accepté immédiatement, entre autres parce que, poussé aux limites, il semble prévoir au début une singularité, où les dimensions s'annulent et où la densité devient infinie. Le nom de Big Bang lui a d'ailleurs été donné un peu en dérision par les tenants d'autres scénarios. Il est donc important de voir quels sont les faits indiscutables qui font qu'aujourd'hui plus personne ne conteste que l'univers ait connu une phase initiale à très haute température et très grande densité.

Une des prédictions de ce modèle est lié au découplage matière-rayonnement qui s'y produit entre $t = 300000$ ans et $t = 1$ million d'années. De sa température de 4000K environ au moment du découplage, le rayonnement universel est ainsi tombé, selon la théorie du Big Bang, à quelques K à notre époque; ce n'est plus qu'un *rayonnement fossile*...

Dans les années 60, deux radio-astronomes, Arno Penzias et Robert Wilson, essayaient de reconvertir en radio-télescope une antenne d'observation désaffectée du satellite Echo. Un "bruit" radioélectrique, isotrope, uniforme, sans variation diurne ou saisonnière leur rendait la vie impossible en se superposant obstinément à toutes leurs observations. Au hasard d'un voyage, l'un d'eux faisait part de leurs difficultés à un astronome qui connaissait des cosmologistes lancés à la recherche du rayonnement fossile du Big Bang. Et en Juillet 1965 deux articles de l'Astrophysical Journal pouvaient ainsi annoncer la découverte de cette trace indiscutable du Big Bang, le *fond diffus cosmologique*. Cela vaudra le prix Nobel de physique 1978 à Penzias et Wilson...

On a pu depuis vérifier que le FDC ainsi détecté avait exactement (à $1/10000$ e près) la forme spectrale prévue par la théorie : c'est un rayonnement de *corps noir* à $2,73\text{K}$. Aucune théorie cosmogonique autre que le Big Bang ne prévoit un tel phénomène. Notons que le FDC, bien avant de se découpler de la matière, avait été créé par divers processus physiques lorsque l'univers était beaucoup plus jeune (~ 1 an). Sa température, identique alors à celle de la matière, était supérieure à 10^7 K.

- **L'ABONDANCE RELATIVE DES ELEMENTS**

Entre une et trois minutes, l'univers primordial est suffisamment refroidi pour que s'assemblent protons et neutrons, les briques constitutives des noyaux atomiques. Mais la décroissance continue de la température arrête très vite le processus : âgé de trois minutes, l'univers est déjà trop vieux, trop froid, pour créer de nouveaux noyaux... Les théories du Big Bang standard prédisent avec beaucoup de succès les quantités respectives de d'hydrogène, de deutérium, d'hélium et de lithium produites dans ces deux minutes cruciales. Par exemple, elle donnent une proportion (massique) de $3/4$ H pour $1/4$ He : c'est bien ce qui est observé, compte tenu du fait que le fonctionnement des étoiles influe sur ce rapport; cela correspond à 94% d'atomes d'hydrogène pour 5,9% d'atomes d'hélium. On étudie surtout le rapport D/H, dans les nuages de gaz interstellaires ($\text{D/H} \sim 2 \cdot 10^{-5}$), critère plus efficace pour tester les théories de Big Bang.

- **LA FORMATION DES ETOILES, DES GALAXIES ET DES GRANDES STRUCTURES**

La théorie du Big Bang fournit un cadre dans lequel on peut expliquer la formation des objets matériels de l'univers, et ce n'est pas là son moindre succès. Nous avons vu que les fluctuations de densité s'amplifient tout naturellement au moment de la recombinaison, et même un peu plus tôt dans l'histoire de l'univers, lorsque la densité de matière l'emporte définitivement sur celle de la lumière. Il faut noter que, par contre, elle ne nous dit pas pourquoi il y avait déjà des fluctuations initiales à amplifier ! Et c'est là un problème qui reste insoluble dans le cadre du Big Bang classique, et auquel l'inflation apporte une réponse. On ne sait pas non plus si ce sont les structures de la taille des amas de galaxies ou les structures de la taille des amas stellaires qui se forment en premier; mais un certain nombre de pistes amènent actuellement à préférer les scénarios "du bas vers le haut", où l'on commence par voir se former d'abord des amas stellaires. Les observations du Hubble Deep Field, par exemple, semblent nous montrer, à très grande distance, une foule de galaxies en formation par la condensation d'amas stellaires bleus (c'est à dire jeunes) déjà bien caractérisés.

Annexe 1 La distance des galaxies

Comment mesurer la distance qui sépare une galaxie de notre Terre ?

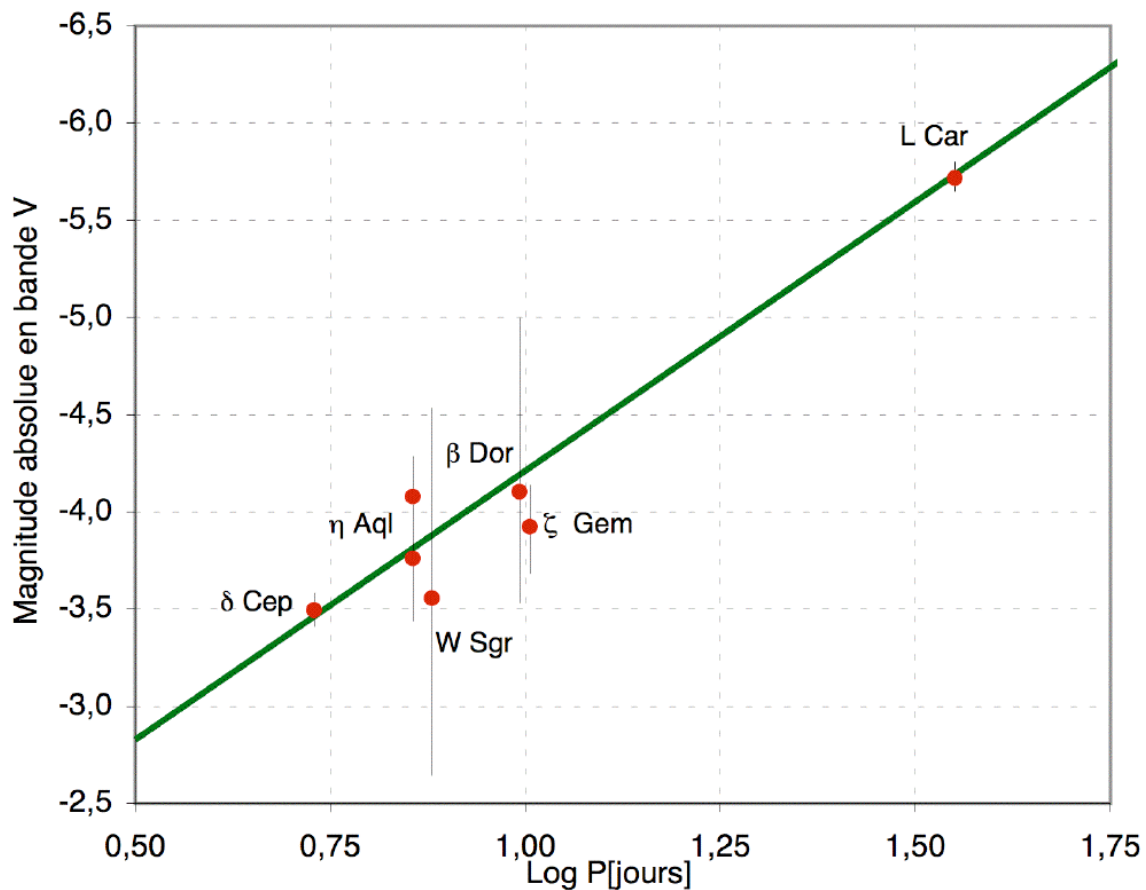
Il existe deux sortes de méthodes :

- les méthodes photométriques qui se basent sur la magnitude apparente d'un objet dont on suppose connue la magnitude absolue :

La première de ces méthodes repose sur l'observation des Céphéïdes. Ces étoiles variables ont une période de pulsation qui dépend directement de leur luminosité maximale. Cette relation a été découverte en 1912 par Henrietta Leavitt en étudiant les Céphéïdes les plus proches de nous.

Le principe consiste alors à détecter une telle étoile dans la galaxie qui nous intéresse, à mesurer sa période de pulsation, et de là en déduire sa magnitude absolue. Sa magnitude apparente nous permet alors de retrouver la distance de l'étoile, donc de la galaxie qui l'héberge.

Cette méthode fonctionne jusqu'à une distance d'environ 15 Mpc, elle est très précise, mais demande beaucoup de temps d'observation et des télescopes puissants.



Les données les plus récentes proviennent des mesures du satellite Hipparcos. On obtient comme relation : $M = -2,81 \log P - (1,43 \pm 0,1)$ avec P période de la Céphéïde, et M sa magnitude absolue.

- On peut appliquer la même méthode avec les supernovae de type I. Tout laisse en effet à penser que celles-ci ont une luminosité maximale constante.
La méthode fonctionne jusqu'à plusieurs centaines de Mpc.
 - De la même manière, on peut aussi se baser sur les nébuleuses planétaires les plus brillantes. Il est facile de repérer celles-ci, parce qu'elles émettent dans des bandes de fréquence très spécifiques. Remarquons que personne n'a encore trouvé une méthode correcte pour mesurer les distances des nébuleuses planétaires les plus faibles à l'intérieur même de notre galaxie !
 - Le même raisonnement peut aussi être appliqué avec les amas globulaires. Cette recherche est plus facile avec les galaxies elliptiques, parce que les amas globulaires se détachent bien du fond uniforme de la galaxie.
 - Enfin, on considère que les galaxies les plus brillantes d'un amas ont toujours la même magnitude absolue. L'incertitude est évidemment beaucoup plus importante qu'avec les autres méthodes, mais permet quand même des mesures jusqu'à 3 ou 4000 Mpc.
- Les méthodes spectrales. Il s'agit là d'utiliser la distribution des fréquences du signal reçu d'un objet.
 - L'étalement du spectre : on part du principe que plus une galaxie est massive, plus la rotation des étoiles autour du noyau est rapide.

Le module de distance

Rappelons l'une des relations permettant de calculer la magnitude absolue d'une étoile :

$$m - M = 5 \log d - 5$$

où

m, la magnitude apparente de l'étoile

M, la magnitude absolue de l'étoile

d, la distance de l'étoile

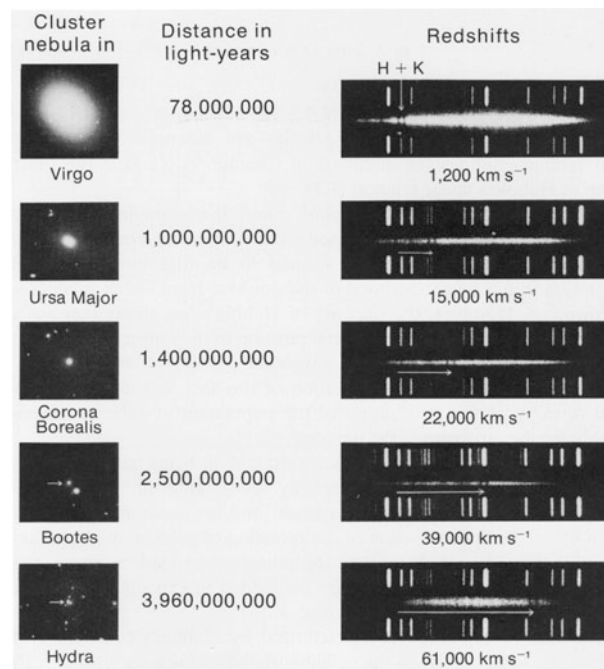
Annexe 2 Le rougissement du spectre des galaxies

Les raies d'absorption que l'on observe à une longueur d'onde λ bien déterminée dans un spectre d'étoile ou d'une galaxie sont en général décalées proportionnellement à leur vitesse d'un facteur Δ par comparaison avec un spectre témoin d'un élément chimique équivalent obtenu en laboratoire; ce phénomène est dénommé le décalage Doppler et représente la variation de la vitesse d'un objet par rapport à l'observateur.

Comme le son d'une ambulance se décale vers les fréquences plus graves quand elle s'éloigne, la lumière d'une galaxie devient plus rouge à mesure qu'elle s'éloigne relativement à la Terre. Ce phénomène est proportionnel à la vitesse de récession de la galaxie. Sa mesure permet de calculer la vitesse apparente de l'objet et d'estimer sa distance.

Ce décalage Z s'exprime par la formule bien connue de Doppler-Fizeau :

$$Z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$



Le décalage Doppler observé dans le spectre d'absorption de quelques galaxies distantes