Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 48 (1990)
Heft: 238

Artikel: Le mesure des distances : 3e partie : les galaxies [Fortsetzung]
Autor: Dumont, Michel
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-898882

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 20.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

LA MESURE DES DISTANCES

MICHEL DUMONT

3e partie: LES GALAXIES*

Au cours d'une nuit sans Lune et à l'écart de toute ville, on distingue une immense arche luminescente qui s'étend suivant un grand cercle de la sphère céleste, c'est la Voie Lactée. Démocrite d'Abdère (né en 460 avant J.-C.) avait émis l'hypothèse qu'il s'agissait sans doute d'une accumulation d'étoiles trop faibles pour être distinguées isolément. Galilée a confirmé cette idée en 1610 lorsqu'il dirigea sa première lunette vers la Voie Lactée. Thomas Wright (1711-1786) comprit plus tard que tous les astres observables formaient un gigantesque système aplati, dont la Voie Lactée était la trace. Ce système, c'est la Galaxie et notre Soleil est l'une de ses étoiles parmi des milliards d'autres.

I. Dimensions de la Galaxie et position du Soleil

Comme toujours, le réflexe anthropocentrique a d'abord placé notre Soleil (et ses planètes) au centre de la Galaxie et jusqu'au début du XXe siècle, les dimensions de la Galaxie sont restées inconnues. En 1918, Harlow Shapley a su localiser la position et la distance du centre de la Galaxie grâce à l'observation des amas globulaires. La figure 1 nous montre le visage typique d'un tel amas.

Pour déterminer la distance des amas globulaires, Shapley utilisa la relation période-luminosité des céphéïdes, que Miss Leavitt avait découverte récemment. Les amas globulaires contiennent de nombreuses étoiles pulsantes qui, dans un premier temps, furent assimilées à des petites céphéïdes.

La distribution des amas globulaires dans le ciel présente une singularité: ils sont presque tous situés dans une moitié de ciel, si bien que leur barycentre est certainement fort éloigné de nous.

Les premières mesures de distance ont fait apparaître que ces amas étaient plus éloignés que n'importe quel objet de la Galaxie. Il est alors raisonnable de penser que les amas globulaires sont à l'extérieur de la Galaxie, que chacun d'entre eux en est un satellite et que leur barycentre doit se trouver à proximité du centre de la Galaxie. C'est ainsi qu'on a pu situer ce centre à près de 10 000 parsecs de notre Système solaire.

Un grand pas fut franchi, dans notre compréhension de la morphologie de la Galaxie, lorsque J.H. Oort publia en 1927 un excellent modèle de la rotation de la Galaxie sur elle-même. La figure 2a donne la vitesse de rotation des étoiles, en fonction de leur distance au centre de la Galaxie.

Dans la Galaxie, l'attraction est dirigée vers le centre et la trajectoire de chaque étoile vérifie donc la loi des aires (deuxième loi de Kepler); mais la masse n'est pas rassemblée au centre, elle est éparpillée dans toute la Galaxie si bien que cette attraction n'est pas en $1/_r^2$ et les trajectoires ne sont donc pas des ellipses. A titre de comparaison, la figure 2b donne la vitesse de rotation des planètes, en fonction de leur distance au Soleil. La vitesse moyenne V obéit à la loi

$$V = \frac{29{,}8}{\sqrt{a}}$$

où V est exprimée en km/s et le demi grand-axe a en U.A.

Après la naissance de la radiostronomie, le modèle de Oort a permis de dresser un véritable plan de la Galaxie. Optiquement, il est impossible d'observer les régions éloignées de la Galaxie à cause de l'extinction de la lumière produite par la matière interstellaire partout répandue dans la Galaxie. Mais cette matière est transparente pour les ondes radio, or les grands nuages d'hydrogène neutre qui peuplent abondamment la Galaxie émettent des ondes radio sur 21 cm de longueur d'onde. La figure 4a montre le profil théorique de la raie d'émission de 21 cm telle qu'on devrait l'observer en provenance d'un nuage d'hydrogène. La figure 4b montre l'un des profils réellement observés. Cette allure est en fait la surimpression de plusieurs raies d'intensités différentes et décalées par rapport à la longueur d'onde de 21 cm par effet Doppler.

Chaque raie est produite par un nuage d'hydrogène neutre et le décalage Doppler est lié à la vitesse radiale du nuage par rapport à nous. La rotation de la Galaxie étant connue grâce au modèle de Oort, il est possible de positionner chaque nuage dans la Galaxie dès que sa vitesse radiale est connue (figure 5). C'est cette étude qui a permis d'établir la structure en spirale de la Galaxie, de localiser les principaux bras, de situer le Soleil dans cet ensemble et d'obtenir une bonne approximation du diamètre de la Galaxie, qui est un peu supérieur à 30 000 parsecs.

2. Les voisins de la Galaxie: amas globulaires et Nuages de Magellan

Notre Galaxie est entourée d'un essaim d'amas globulaires tandis qu'un peu plus loin, on rencontre le Grand et le Petit Nuages de Magellan, qui sont en fait les deux galaxies les plus proches de la nôtre. Les autres galaxies sont beaucoup plus éloignées et le premier problème est de déterminer la distance des amas globulaires et celle des Nuages de Magellan.

La mesure de la distance des amas globulaires par l'observation de leurs variables pulsantes rencontrait deux difficultés:

1. Les pulsantes d'amas ont une période beaucoup plus courte que les céphéïdes; obéissent-elles à la même relation période-luminosité?
2. Cette relation fut étalonnée dans le petit Nuage de Magellan dont la distance était très mal connue et qui par ailleurs ne contient aucune pulsante à courte période analogue à celles des amas globulaires.

En définitive, la distance de ces objets est restée longtemps très imprécise. De nombreuses pulsantes à courte période ont été découvertes dans notre Galaxie. La plus brillante d'entre

---

* *suite du numéro 227*

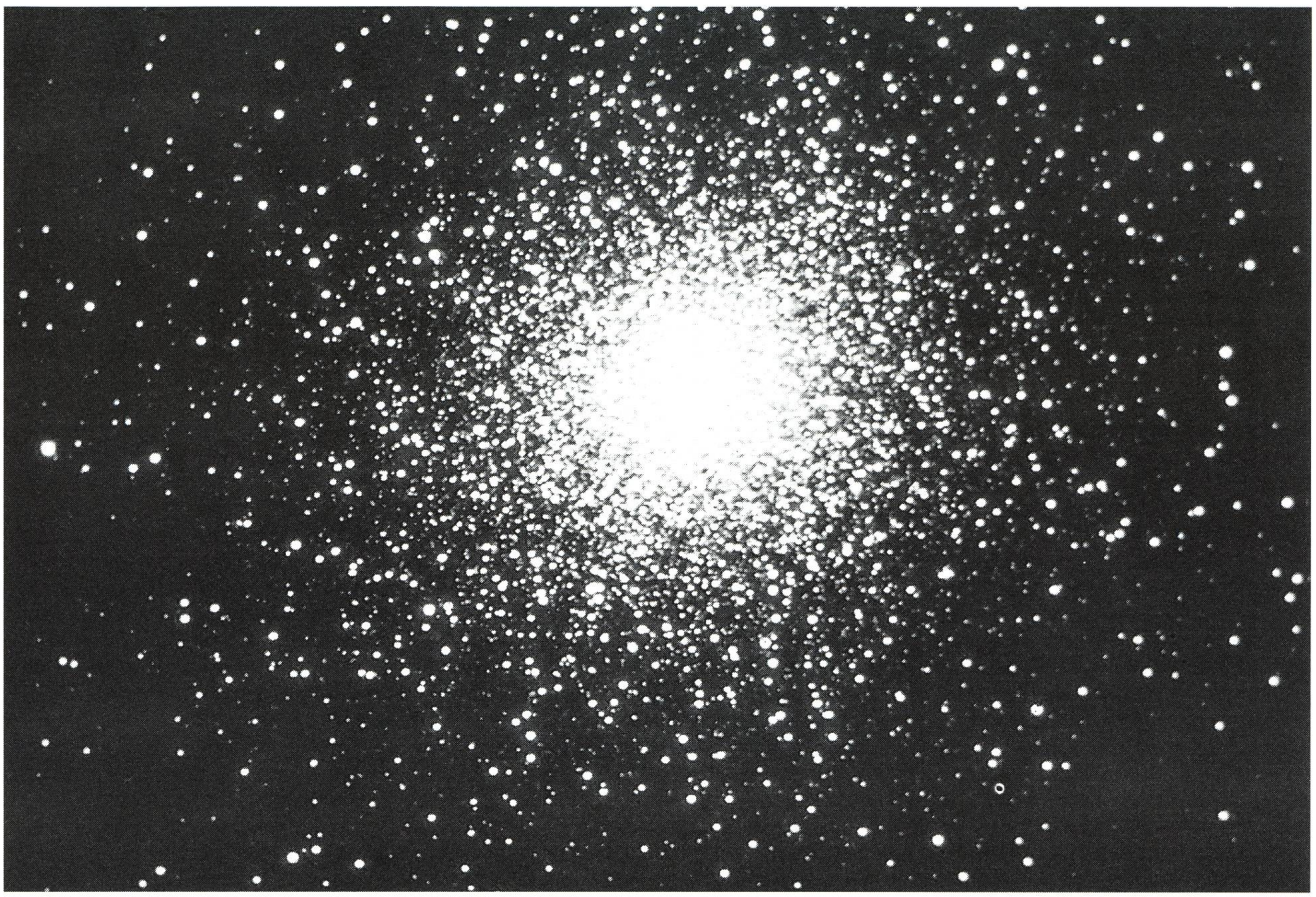
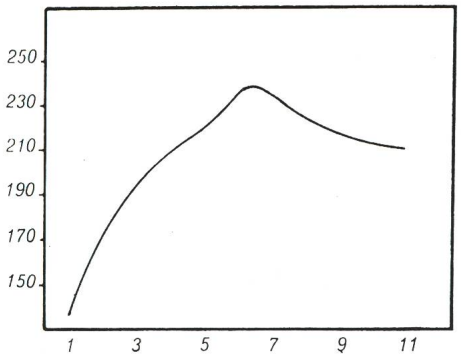
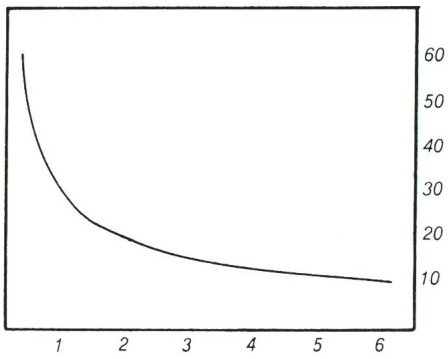


Figure 1 L'amas globulaire M 13 dans la constellation d'Hercule



2 a



2 b

Figure 2
2a: vitesse de rotation des étoiles de la Galaxie en fonction de leur distance au Centre. En abscisse: la distance en kiloparsecs. En ordonnée: la vitesse en kilomètres par secondes.

2b: rotation des planètes autour du Soleil. En abscisse: la distance des planètes au Soleil, en Unités Astronomiques. (1 UA = 149 600 000 km). En ordonnée: la vitesse en kilomètres par seconde. Dans ce cas, la vitesse moyenne V des planètes obéit à la loi

$V = \frac{29,8}{\sqrt{a}}$ *où a est le demi grand-axe de l'orbite en U.A.*

Figure 4 – v km/s – 100 – 50 0 + 50 + 100

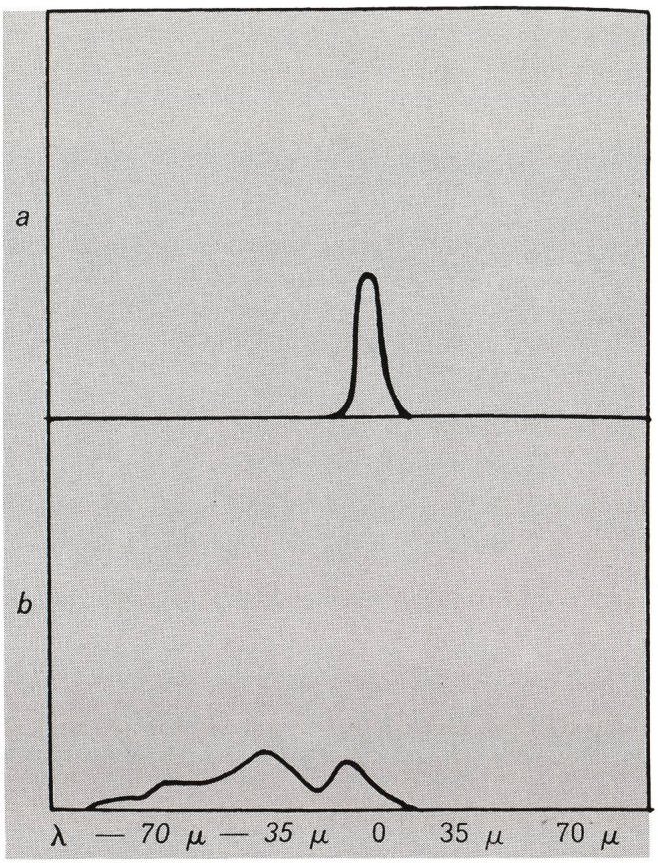


Fig. 4 – La raie de 21 cm de l'hydrogène neutre. Ces courbes montrent la quantité d'énergie reçue en fonction de la longueur d'onde. En abscisse, le zéro correspond à λ = 21.1061 cm. a: profil théorique; b: la raie de 21 cm observée à la longitude galactique l = 80°. Dans cette direction, il y a 4 nuages d'hydrogène qui se rapprochent de nous aux vitesses de 15, 50, 95 et 135 km/s respectivement.

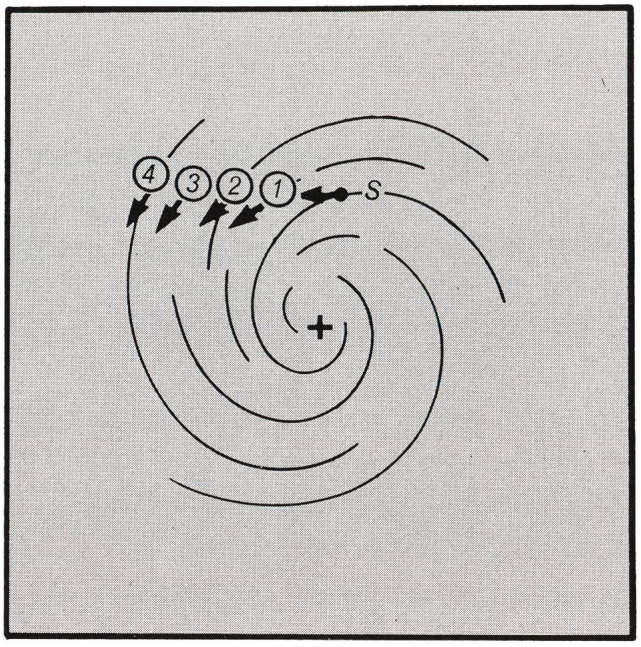


Fig. 5 – Exemple d'interprétation du profil de la raie de 21 cm. Supposons qu'el'on observe dans la direction du mouvement du Soleil autour du centre de la Galaxie (+). D'après le modèle de Oort (fig. 2 a), les nuages d'hydrogène ①, ②, ③ et ④, ont une vitesse inférieure à celle du Soleil. Leur vitesse radiale sera donc négative, faible pour ①, beaucoup plus forte pour ④. En effet, de ① à ④, nos nuages, de plus en plus éloignés, ont une vitesse propre de moins en moins grande; d'autre part, le mouvement de ③ et ④, observé du Soleil est essentiellement tangentiel. Le profil de la raie de 21 cm ressemblera donc à celui de la figure 4b.

elles est l'étoile RR Lyrae dont la magnitude varie de 7,20 à 8,57 en 13 h 36 mn 12 s. Par analogie, les pulsantes à courte période sont dites du type RR Lyr (ou simplement RR).

A partir de 1922, grâce au télescope de 2,54 m du Mont Wilson, on a pu résoudre en étoiles la «nébuleuse» d'Andromède M 31 et se convaincre ainsi qu'il ne s'agissait pas d'une nébuleuse mais d'une autre galaxie. Avec cet instrument, on distinguait quelques céphéïdes dans M 31, mais aucune étoile du type RR qui, si elles vérifiaient la loi période-luminosité, devaient être de magnitude 22 ou 23 et donc un peu trop faible pour ce télescope.

Achevé en 1948, le grand télescope de 5 m du Mont Palomar ne permit pas non plus d'apercevoir les RR de M 31 qui étaient donc nettement plus faibles que la 23e magnitude. La distance de M 31 avait été largement sous-estimée et manifestement, les RR n'obéissent pas à la loi des céphéïdes. En 1952, Walter Baade proposa de distinguer deux populations d'étoiles:

- Les étoiles de population 1 que l'on rencontre au voisinage du Soleil et de façon générale, dans notre région de la Galaxie, dans les galaxies irrégulières – comme les Nuages de Magellan – et dans les bras des galaxies spirales. Ces étoiles sont relativement riches en métaux. Les plus lumineuses d'entre elles sont des supergéantes bleues de magnitude absolue -8.
- Les étoiles de population 2, localisées dans les amas globulaires et dans la région centrale des spirales. Ce sont probablement des étoiles très anciennes, pauvres en éléments lourds car elles sont nées à un époque où l'Univers contenait une proportion de métaux beaucoup plus faible qu'aujourd'hui. Les plus lumineuses sont des géantes rouges de magnitude absolue -2.

Les céphéïdes du Petit Nuage de Magellan sont des supergéantes de population 1, tandis que les RR sont des étoiles de population 2 de magnitude absolue voisine de +1 et pour lesquelles il n'existe pas de relation période-luminosité.

Depuis les années 50, le diamètre des télescopes n'a pas tellement progressé, en revanche les récepteurs, spectrographes, photomètres... ont fait un progrès considérable. Aujourd'hui, on peut dresser un diagramme HR assez complet des Nuages de Magellan, mesurer leur distance à 10% près, puis recalibrer la relation période-luminosité des céphéïdes et l'utiliser pour mesurer la distance des galaxies les plus proches.

En 1948, on plaçait M 31 à 750 000 années-lumière. Aujourd'hui, on sait que cette distance est plutôt de 2 200 000 al!... avec là encore une incertitude de 10 à 15%.

3. La distance des galaxies

La mesure de la distance des galaxies est un problème délicat, d'autant plus difficile que la galaxie est éloignée. Toute une série de méthodes ont été mises en jeu:

- les céphéïdes brillantes, de magnitude absolue -5 sont repérables jusqu'à 4 mégaparsecs avec les plus grands instruments.

- les supergéantes bleues (M = -8) sont visibles de loin (25 mégaparsecs), mais ce sont des astres exceptionnels et rares dont la magnitude absolue est un peu incertaine. En outre, à grande distance, on risque de confondre une supergéante avec un amas d'étoiles ou même avec une petite région HII.
- la plupart des galaxies sont entourées d'un essaim d'amas globulaires. La magnitude absolue d'un tel amas est M = -7,5 ± 1,0. L'identification de ces amas permet donc d'évaluer la distance de la galaxie (à un facteur 1,5 près).
- les NOVAE sont des étoiles victimes d'explosion brutale, elles peuvent atteindre la magnitude absolue -9, mais la dispersion des magnitudes atteintes est trop grande pour espérer une mesure précise de la distance.
- les SUPERNOVAE sont beaucoup plus spectaculaires (jusqu'à M = -17,5) mais sont aussi très différentes les unes des autres. On peut obtenir par l'apparition de l'une d'entre elles un ordre de grandeur de la distance (à un facteur 3 près), mais dans une galaxie donnée, l'explosion d'une supernova est un phénomène très rare. Les supernovae sont visibles de très loin (plus d'une milliard de parsecs!) et offrent la possibilité de placer des jalons çà et là dans l'Univers.

4. Le groupe local

Parmi les quelques milliers de galaxies dont on a déterminé la distance, on constate que quelques dizaines sont situées à moins de 1,3 mégaparsecs; ensuite, il n'y a plus rien jusqu'à 2,4 mégaparsecs. Il existe donc un groupe local de galaxies, nettement isolé et auquel nous appartenons. Le tableau suivant rassemble quelques données sur les galaxies principales du groupe.

5. La relation de Tully-Fischer

A grande distance, on ne distingue plus les étoiles peuplant les galaxies et la mesure des distances est encore plus difficile. On a trouvé des corrélations entre la morphologie des galaxies et leur magnitude absolue, mais les incertitudes sont fort grandes. En 1975, une nouvelle méthode fut introduite par Brent Tully et Richard Fischer. Cette technique repose sur l'observation de la raie de 21 cm de l'hydrogène neutre émise par la galaxie.

Si la galaxie est vue de face, la raie d'émission se présente sous l'aspect de la figure 4a. Sa longueur d'onde est en général décalée par effet Doppler, mais ce décalage n'intervient pas dans la méthode. La rotation de la galaxie n'introduit pas de vitesse radiale par rapport à nous et ne modifie donc pas l'aspect de la raie.

Galaxies	Constellation	Magnitude apparente visuelle	Type	Magnitude absolue	Distance en millions d'années lumière
Notre Galaxie			Spirale Sb	-19,8	
Grand Nuage	Dor	0,3	Irr	-18,2	0,165
Petit Nuage	Tuc	2,4	Irr	-16,6	0,205
	Dra	10,6	Eo	- 8,5	0,22
	UMi	10	Eo	- 9	0,22
NGC 2419	Lyn	11,5	amas globulaire	- 7,7	0,23
NGC 6273	Scl	7	Eo	-12,6	0,28
	UMa		Eo		0,39
Sextant C	Sex		Eo		0,46
	For	7	Eo	-14	0,55
Leo I	Leo	10,8	Eo	-11	0,75
Leo II	Leo	12,3	Eo	- 9,5	0,75
NGC 6822	Sgr	10,0	Irr	-13,9	1,53
NGC 3946	Cep	15,5		- 8,4	2,0
NGC 205	And	9,4	E5	-14,6	2,1
M 31	And	3,4	Sb	-20,7	2,2
M 32	And	8,2	Eo	-15,9	2,2
NGC 185	Cas	9,4	E5	-14,7	2,2
NGC 147	Cas	9,7	E5	-14,4	2,2
M 33	Tri	5,8	Sc	-18,6	2,4
IC 1613	Cet	9,6	Irr	-14,8	2,4
WLM			Irr		2,8
Sextant A	Sex		Irr		3,3
Leo A	Leo		Irr		3,6
IC 10			S		4,1

Fig. 6 – La Galaxie NGC 4565 dans la constellation de la Chevelure de Bérénice.

Si la galaxie est vue exactement de profil (figure 6), sa rotation déforme complètement la raie (figure 7). L'une des extrémités de la galaxie se rapproche de nous, tandis que l'autre s'éloigne. La largeur Wo de la raie de 21 cm est directement liée à la vitesse de rotation de la galaxie; cette vitesse de rotation est fonction de la masse de la galaxie; cette masse est essentiellement dispersée sous forme d'étoiles; il existe donc une relation entre la masse et le nombre d'étoiles, c'est-à-dire entre la masse et la magnitude absolue de la galaxie. Cette relation a été établie pour les galaxies proches de nous, dont la distance est bien connue:

- $M = 6{,}0 \log Wo + 4{,}0$

où Wo est exprimée en km/s et les logarithmes sont décimaux.

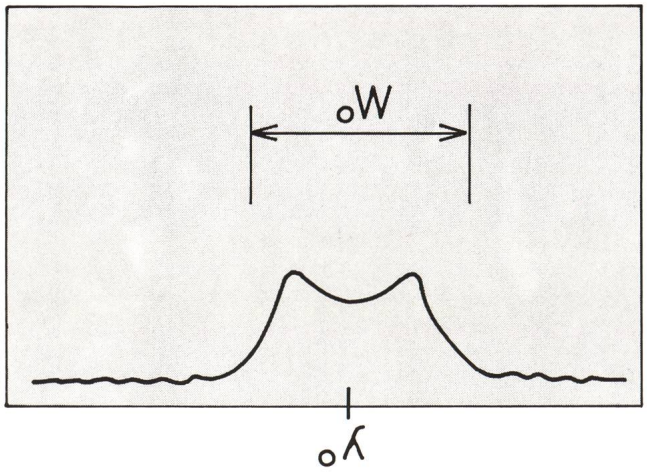


Fig. 7- Si la Galaxie est vue de profil, la raie de 21 cm n'aura pas l'aspect de la figure 4a, mais plutôt celui-ci. La rotation de la Galaxie élargit la raie par effet Doppler. Wo est la largeur exprimée en km/s.

Si la galaxie est vue sous un angle quelconque, on suppose que son contour réel est circulaire; alors le rapport b/a du petit axe au grand axe apparents (figure 8) permet de connaître l'angle sous lequel la galaxie est visible (figure 9):

$\cos i = \frac{b}{a}$ et la largeur observée W de la raie de 21 cm vérifie la relation

$W_o = \frac{W}{\sin i} = \frac{W}{\sqrt{1-\frac{b^2}{a^2}}}$ où Wo est la largeur que l'on observerait si la galaxie était vue de profil. Cette méthode est applicable aux galaxies spirales ou lenticulaires dont on a pu enregistrer la raie de 21 cm avec un radiotélescope.

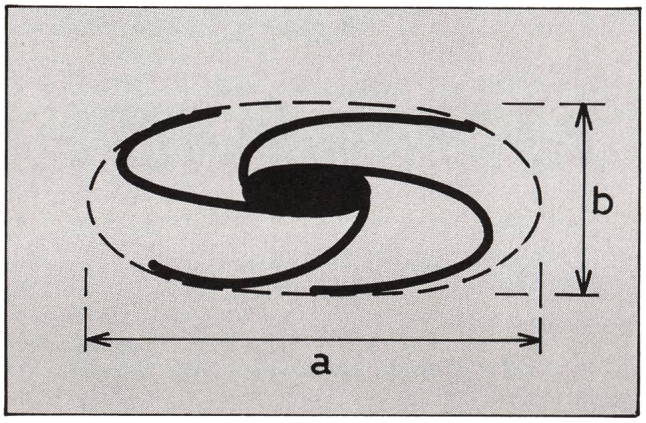


Figure 8

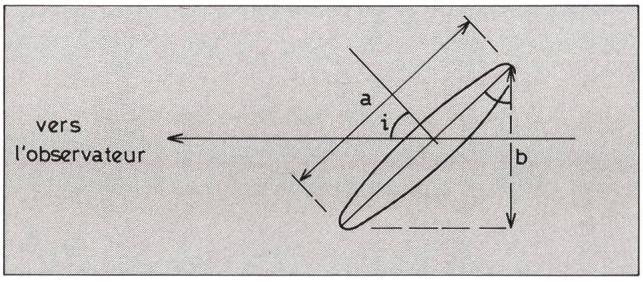


Fig. 9 – (d'après G. Paturel, Cahiers CLAIRAUT)
Si la Galaxie est vue sous un angle i quelconque, on a cos i = b:a, où b est le petit axe apparent et a le grand axe apparent. La méthode suppose évidemment que le contour de la Galaxie est circulaire et s'applique donc exclusivement aux spirales et aux galaxies lenticulaires.

6. L'expansion de l'Univers

Melvin Slipher, directeur de l'Observatoire Lowell à Flagstaff, publia en 1925 un article concernant les vitesses radiales des galaxies spirales déterminées par effet Doppler.

A l'exception de M 31, toutes les galaxies étudiées par Slipher s'éloignent de nous à des vitesses parfois considérables, jusqu'à 1800 km/s. Hubble et Humason développèrent cette étude au grand télescope de 2,54 m du Mont Wilson et confirmèrent le décalage systématique vers le rouge des raies du spectre des galaxies. En 1929, Hubble énonça la fameuse loi (figure 10):

$$V = H.D$$

où V est la vitesse de fuite, D la distance et H la constante dite de Hubble dont la valeur est, aujourd'hui encore, mal connue. A cette époque, les plus grandes vitesses observées étaient voisines de 80 000 km/s.

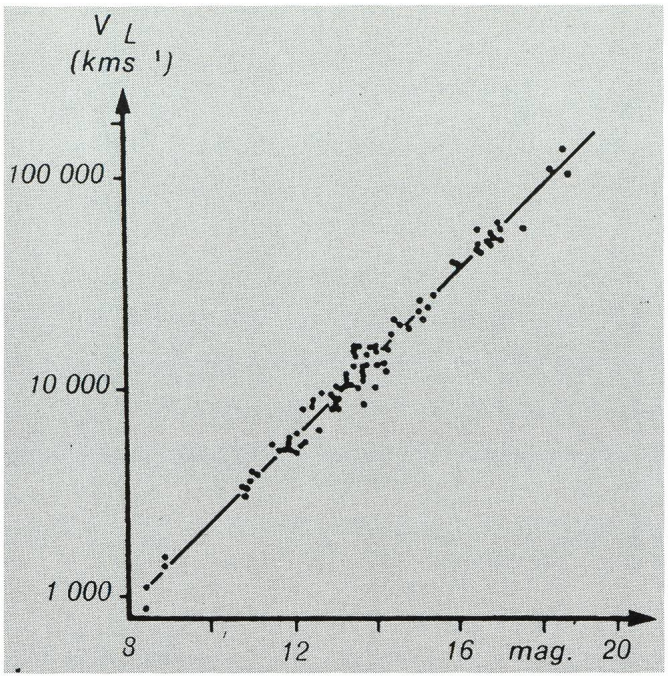


Fig. 10 – Diagramme de Hubble pour les galaxies les plus brillantes de 83 amas (d'après J. Heidmann). En abscisse: la magnitude apparente: en ordonnée, la vitesse de récession.

La valeur de H est très difficile à déterminer:

- Pour les galaxies proches, on connaît bien la distance, mais la vitesse V est faible et sa valeur est noyée par les mouvements parasites dont certains sont bien connus (mouvement de rotation de la Terre, mouvement de la Terre autour du Soleil, déplacement du Système solaire vers l'apex) ... mais d'autres encore très mal déterminés:
  - révolution du Soleil autour du centre de la Galaxie; la vitesse probable de ce déplacement est de 250 km/s
  - mouvement de la Galaxie au sein du Groupe Local
  - mouvement probable du Groupe Local par rapport à d'autres amas, notamment l'amas Virgo auquel le Groupe Local est peut-être lié.
- Pour les galaxies très éloignées, la vitesse de fuite est largement dominante et mesurable, mais alors on ne sait plus calculer leur distance avec précision. La constante H est donc difficile à connaître. On admet aujourd'hui:

$H = (65 \pm 15)$ km/s par mégaparsec

Inversement, la connaissance de H offre un moyen pratique pour calculer les distances. On mesure, par effet Doppler, la vitesse V, alors $D = V/H$. La relation de Tully-Fischer est utilisable jusqu'à 100 mégaparsecs. Au-delà, la loi de Hubble est la seule méthode actuellement connue pour estimer la distance d'une galaxie.

On notera que le décalage vers le rouge de la lumière des galaxies n'est pas vraiment un effet Doppler, c'est la marque de l'expansion de l'Univers. Les galaxies sont au repos dans un contenant qui se dilate et cette dilatation se traduit par une fuite apparente des galaxies.

Aux faibles vitesses, on peut utiliser la relation

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{V}{C}$$

où la longeur d'onde λ est décalée de $\Delta\lambda$; V est la vitesse de fuite de la galaxie et C la vitesse de la lumière. Pour de grandes valeurs de

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

la formule relativiste

$$V = C\,\frac{(1+Z)^2-1}{(1+Z)^2+1}$$ permet d'estimer la vitesse de récession.

Actuellement, le plus grand décalage Z observé est supérieur à 4 et correspond à une vitesse voisine de $\frac{9c}{10}$

On se gardera d'annoncer la distance de tels astres. En appliquant la loi de Hubble, on aboutirait à un peu plus de 4 milliards de parsecs, la distance étant d'ailleurs fonction du modèle géométrique que l'on choisit pour décrire l'Univers. La lumière met plus de 10 milliards d'années pour parcourir une telle distance. Pendant ce parcours, l'Univers a certainement évolué de façon significative, la distance elle-même a pu se modifier grandement ... On se bornera donc pour les objets les plus éloignés, à noter la valeur de Z ... jusqu'à ce que nos connaissances en cosmologie permettent un jour peut-être d'attribuer une distance à chaque valeur de Z.

Adresse:
Michel Dumont, Palais de la Découverte,
Av. Franklin D. Roosevelt, F – 75008 Paris

Feriensternwarte
CALINA CARONA

Calina verfügt über folgende Beobachtungsinstrumente:
Newton-Teleskop ø30 cm
Schmidt-Kamera ø30 cm
Sonnen-Teleskop

Den Gästen stehen eine Anzahl Einzel- und Doppelzimmer mit Küchenanteil zur Verfügung. Daten der Einführungs-Astrophotokurse und Kolloquium werden frühzeitig bekanntgegeben. Technischer Leiter: Hr. E. Greuter, Herisau.

Neuer Besitzer: **Gemeinde Carona**
Anmeldungen: **Feriensternwarte Calina**
Auskunft: **Postfach 8, 6914 Carona**