

INSTITUT DE FRANCE

---

ACADÉMIE DES SCIENCES

---

## EXPOSÉ SUR L'ASTRONOMIE

### OBSERVATION OPTIQUE DES GALAXIES NORMALES

PAR

M. CHARLES FEHRENBACH

Membre de l'Académie des Sciences

en la séance du 9 mai 1977

---

L'objet principal des grands télescopes est certainement l'observation des nébuleuses extragalactiques.

J'ai présenté à l'Académie des résultats obtenus avec le grand télescope européen de 3,60 m de diamètre installé au Chili (<sup>1</sup>). Je n'ai pas l'intention de revenir sur ce sujet, sinon pour redire que ce sont à la fois le diamètre du télescope et la finesse des images qu'il donne qui définissent sa qualité.

Si nous observons la galaxie la plus proche visible de l'hémisphère Nord, la grande nébuleuse d'Andromède, Messier 31, avec un petit télescope, nous ne pouvons pas distinguer les étoiles individuelles qui ne font que renforcer localement la brillance. Avec les grands télescopes, il n'est possible d'y distinguer que des étoiles 100 fois plus lumineuses que le Soleil, mais les étoiles plus faibles sont toujours invisibles sur le fond du ciel.

Rappelons que les astronomes expriment les éclats stellaires dans une échelle logarithmique, celle des magnitudes. Les étoiles les plus brillantes du ciel ont sensiblement la magnitude 0, cette grandeur augmente de 5 quand l'éclat est divisé par 100. Une étoile de magnitude 23 correspond sensiblement à une étoile dont l'éclat est 10 millions de fois plus faible qu'une étoile tout juste visible à l'œil nu.

Dans les meilleures conditions, une région du ciel d'une surface carrée de 1" de côté, ne contenant pas d'astres, luit comme une étoile de 23<sup>e</sup> magnitude. Cette lumière provient à la

fois de la luminescence de la haute atmosphère et de la lumière solaire diffusée dans l'espace interplanétaire. Ces deux contributions sont sensiblement égales.

On comprend que si une étoile de 23<sup>e</sup> magnitude se superpose à ce fond, le contraste dépend essentiellement de la finesse de l'image stellaire et un mauvais télescope de grand diamètre ou même un bon télescope, un jour de mauvaises images, ne permettra pas de distinguer une telle étoile.

Supposons que nous observions des petites galaxies de 2" de diamètre. Avec un télescope donnant des images de 1", on distinguera celles-ci facilement des étoiles par leurs dimensions et leur aspect, alors qu'un télescope donnant des images de 2" ne permettra pas de distinguer les étoiles des galaxies. Avec un tel instrument, on pourra confondre une étoile située à quelques années de lumière avec une galaxie formée de centaines de milliards d'étoiles et située à des milliards d'années de lumière.

L'objet de cet exposé est de montrer les résultats obtenus avec des instruments modernes dans l'étude des galaxies classiques.

Les deux galaxies les plus proches de notre Galaxie sont les deux Nuages de Magellan qu'on peut considérer comme des satellites de notre système.

Il s'agit de deux nébuleuses irrégulières. Ce sont des objets diffus visibles à l'œil nu dans le ciel austral. Elles ont l'aspect de lambeaux détachés de la Voie Lactée. Leur étude est poursuivie activement depuis le siècle dernier car ce sont les seuls systèmes dans lesquels nous puissions étudier individuellement des étoiles relativement faibles, comparables à notre Soleil. J'ai moi-même commencé l'étude de ces systèmes en Afrique du Sud et au Chili et actuellement une dizaine d'astronomes français continuent ces travaux dans diverses directions. Notre groupe y a notamment reconnu puis étudié les 600 étoiles les plus brillantes qui ont des éclats de l'ordre de 50 000 à 600 000 Soleils. On peut les étudier avec une précision comparable à celle qu'on peut obtenir pour les étoiles de notre Galaxie.

Une astronome américaine de Harvard, Miss Leavitt, travaillant dans l'hémisphère austral, a fait au début de ce siècle une découverte fondamentale. Elle reconnut dans le Petit Nuage un certain nombre d'étoiles variables du type de l'étoile galactique  $\delta$  Céphée. Il s'agit d'étoiles pulsantes, dont le diamètre et la température et donc aussi l'éclat varient périodiquement. Sa grande découverte fut de constater qu'il y avait une relation entre la période de l'oscillation et l'éclat intrinsèque de l'étoile : les plus brillantes ayant des périodes de 100 jours, les plus faibles, de l'ordre de quelques jours. On rapprochera cet effet de la variation de la période d'un pendule avec sa longueur. La ressemblance n'est d'ailleurs pas uniquement formelle.

On voit tout de suite que nous avons à notre disposition une voie royale pour déterminer la distance des Céphéides et donc celle des galaxies qui les contiennent. Il suffit d'en mesurer la période pour en déduire l'éclat intrinsèque. La mesure de l'éclat apparent permet, en appliquant la loi de l'inverse du carré de la distance, de calculer la distance.

Malheureusement, les astronomes se sont heurtés à de grandes difficultés pour faire l'étalonnage en valeur absolue des éclats des Céphéides car, même dans notre Galaxie, la détermination directe de leurs distances est impossible.

Pendant 50 ans, on s'est servi d'une échelle fausse d'au moins un facteur 4 pour leurs éclats et lorsqu'on reconnut cette erreur, il fallut multiplier les distances anciennes par un facteur de l'ordre de 2.

Aujourd'hui, les distances des Nuages de Magellan sont bien connues grâce à de nombreuses recherches sur les astres de ces galaxies. Indiquons qu'une excellente détermination a été faite récemment par des astronomes français de l'Institut d'Astrophysique en collaboration avec ceux de Marseille. On est en général d'accord sur les distances suivantes des Nuages de Magellan :

Grand Nuage : 52 000 pc ou 170 000 années de lumière;

Petit Nuage : 63 000 pc ou 205 000 années de lumière.

L'unité normalement utilisée par les astronomes est le parsec qui vaut 30 800 milliards de kilomètres. L'unité populaire est l'année de lumière : 1 pc = 3,26 années de lumière (a. d. l.). Indiquons que le diamètre de notre Galaxie est de 100 000 années de lumière.

On reconnaît dans les Nuages de Magellan tous les astres brillants de notre Galaxie : étoiles supergéantes, amas globulaires, novae, étoiles particulières, nébuleuses gazeuses. Bien qu'il y ait sûrement des différences de détail, ces astres sont comparables à ceux de la Galaxie, et nous pouvons d'ailleurs étudier certaines de leurs propriétés avec plus de précision que dans notre système.

Si j'ai un peu insisté sur ces astres, c'est parce qu'ils sont les plus faciles à étudier à cause de leur proximité, mais ils nécessitent déjà des moyens puissants. Les étoiles supergéantes les plus lumineuses, rayonnant comme 600 000 Soleils, ont la 9<sup>e</sup> grandeur. C'est aussi la magnitude apparente des novae au moment de leur maximum. Mais les Céphéides les plus brillantes, pulsant avec une période de 100 jours, n'atteignent que la 11<sup>e</sup> grandeur. Les amas globulaires ont des magnitudes de 10 à 11 et des diamètres angulaires de l'ordre de 2'.

On comprend facilement les difficultés que nous rencontrons lorsqu'il s'agit d'étudier des astres plus lointains.

La galaxie la plus proche ayant un aspect semblable à notre propre Galaxie est celle d'Andromède située à 2,2 millions d'années de lumière (670 000 pc). Elle est 12 fois plus lointaine que les Nuages de Magellan et les astres identiques y apparaissent 150 fois plus faibles. Leur magnitude est augmentée de 5,5. Les Céphéides les plus brillantes sont des étoiles de 17<sup>e</sup> grandeur, les amas globulaires sont de 16<sup>e</sup> grandeur et n'ont des diamètres que de l'ordre de 10" d'arc.

Mais leur étude est parfaitement possible. La nébuleuse d'Andromède et la quinzaine de galaxies qui forment ce qu'on nomme le groupe local sont bien connues.

On observe de plus une vingtaine de galaxies plus brillantes que la 9<sup>e</sup> magnitude. Elles sont situées à des distances comprises entre 2,3 et 4,6 millions de parsecs (7,5 et 15 millions d'années de lumière). Pour ces astres, la reconnaissance des étoiles isolées, bien que difficile, est possible et la distance de ces systèmes paraît maintenant bien établie : les étoiles les plus brillantes de ces galaxies ont des magnitudes de 18 à 20.

Une étude d'ensemble a permis de classer ces galaxies d'après leurs formes dans le schéma de la figure 1.

Il est évident que ces astres sont tous très différents. Néanmoins, on a pu estimer leurs éclats totaux qui dans l'échelle des magnitudes absolues varient de -16 à -21, c'est-à-dire qu'elles brillent comme 250 millions ou 25 milliards de Soleils (pour notre Galaxie,  $M = -20,5$ ).

Il est possible, à l'aide de spectrographes sensibles, de montrer que, comme dans notre Galaxie, les astres tournent autour du centre de gravité du système. Les lois de Képler permettent alors de déterminer les masses de ces systèmes. Les plus grands ont des masses de l'ordre de 300 milliards de Soleils. Notre Galaxie est assez quelconque : elle luit comme 16 milliards de Soleils et a une masse de 140 milliards de Soleils.

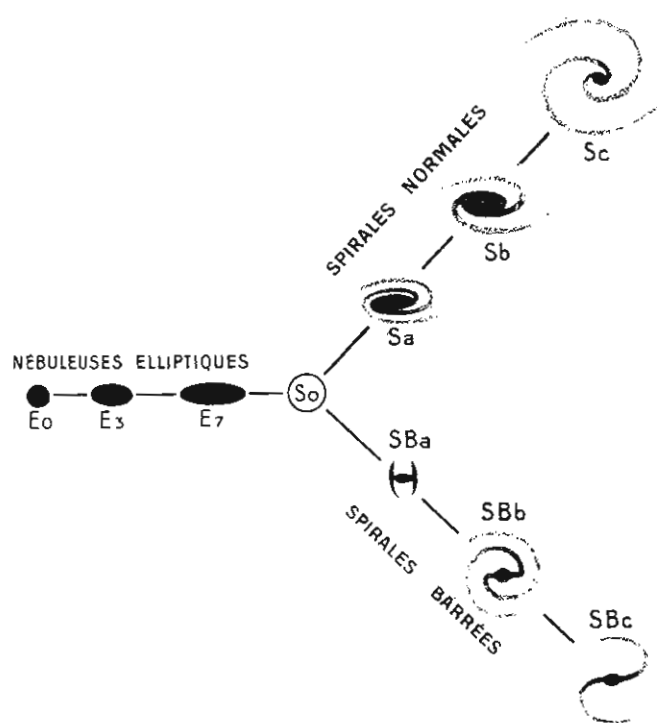


Fig. 1. — Classification schématique des galaxies. On distingue :  
les galaxies spirales normales S; les galaxies spirales barrées SB; les galaxies elliptiques E.

Signalons en passant que nous connaissons aussi quelques systèmes nains, elliptiques ou irréguliers, qui n'ont que des éclats de  $3 \cdot 10^6$  Soleils et des masses de  $4 \cdot 10^6$  Soleils. Certaines de ces galaxies naines sont assez proches de nous, à peine plus éloignées que les Nuages de Magellan.

L'étude des nébuleuses devient de plus en plus difficile au fur et à mesure que leurs distances sont plus grandes; il devient impossible d'y distinguer des étoiles isolées. Les seules mesures

#### EXPLICATION DES PLANCHES

##### Planche I

Photographie du Grand Nuage de Magellan. Galaxie la plus proche de notre Univers, située à 170 000 années de lumière. elle est beaucoup plus petite que la nôtre. Photographie obtenue à la Station de Bloemfontein avec un petit télescope.

##### Planche II

Nébuleuse spirale NGC 5236 ou Messier 83. Cette nébuleuse de classe Sc, montre des bras multiples. Sa distance est estimée à 10 millions d'années de lumière. Photographie obtenue avec le télescope de 3,60 m de l'organisation européenne de recherches astronomiques australes (E.S.O.). Exposition de 1 h avec plaque sensible dans le bleu. (Cliché négatif).

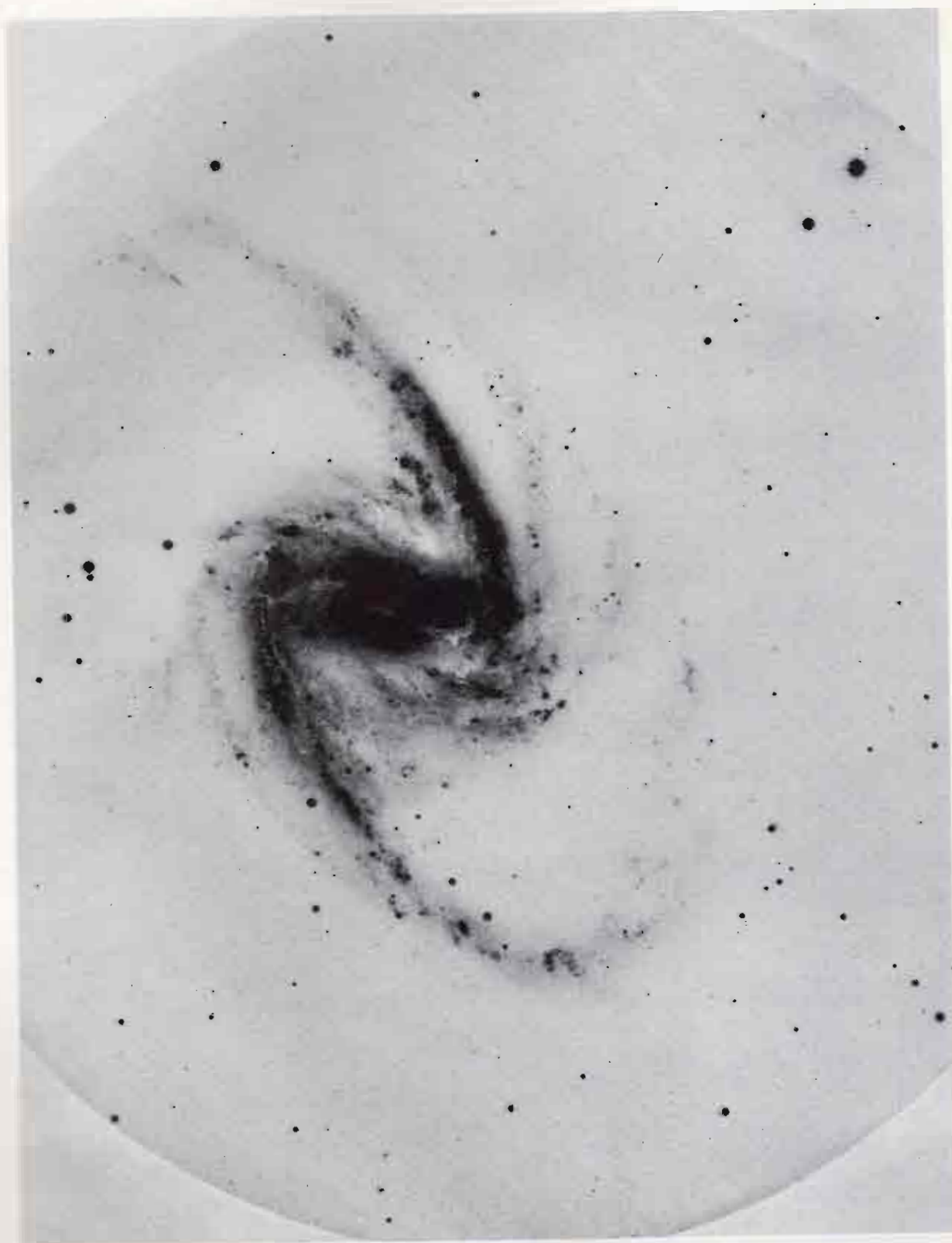
##### Planche III

Nébuleuse spirale barrée NGC 1365. La structure en barre est très nette SBb. Cette galaxie est située à plusieurs dizaines d'années de lumière. Pose de 1 h. dans le bleu avec le télescope de 3 m. de l'E.S.O. (Cliché négatif).

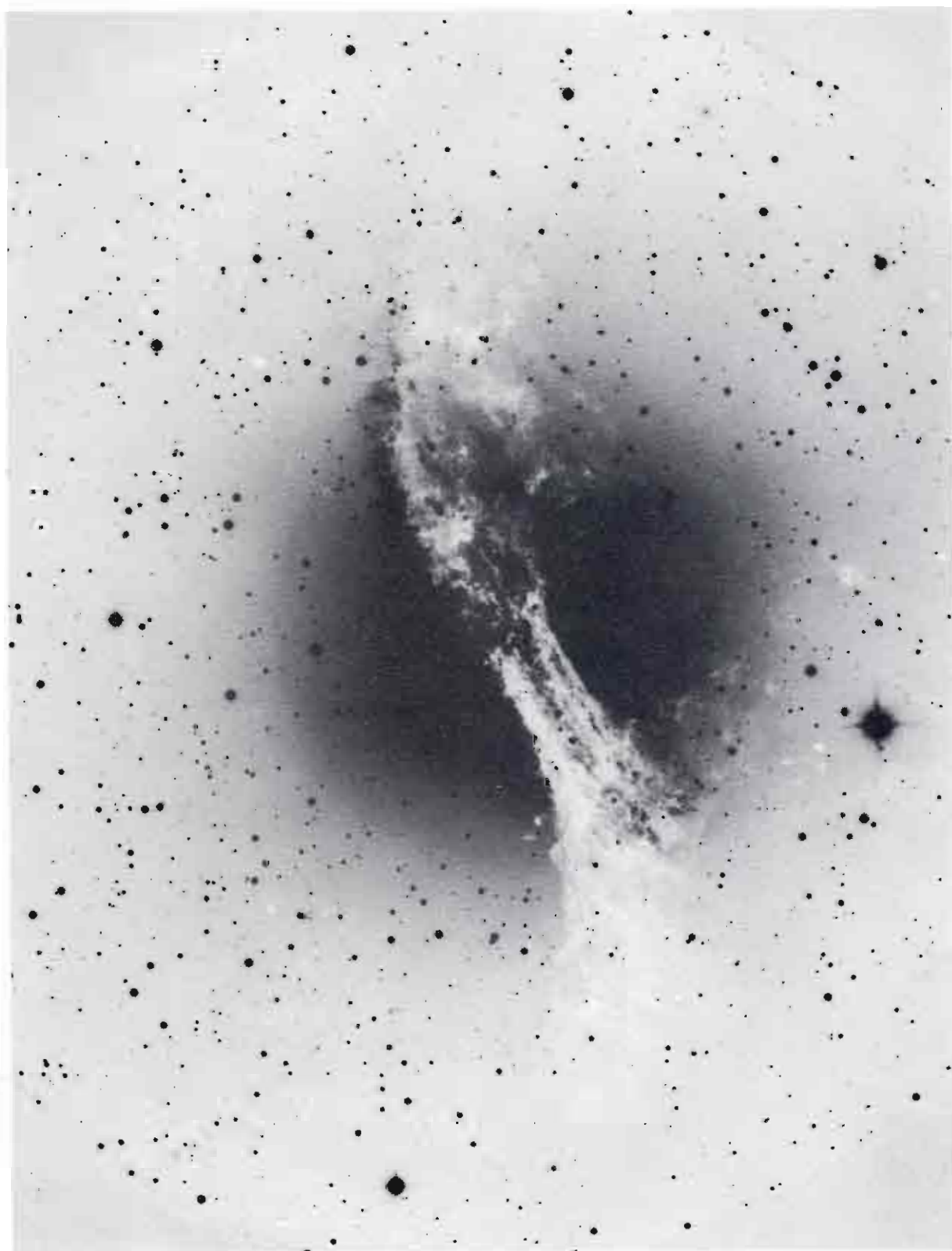
















ordonnées et porter en abscisse la distance tirée de la formule qui lie les magnitudes aux distances :

$$m - M = -5 + 5 \log D.$$

Nous avons adopté ce second artifice dans notre figure 3; nous avons pris pour la valeur de  $M$  la magnitude absolue  $M = -21,5$  ce qui correspond sensiblement à des galaxies aussi brillantes que notre Galaxie. On constate que les points se placent bien suivant une droite dont la pente, nommée Constante de Hubble, est le taux d'expansion de l'Univers, c'est-à-dire la vitesse dont s'éloignent deux nébuleuses situées à un million de parsecs. Avec la valeur de la magnitude autrefois adoptée ( $M = -20$ ), on trouvait  $H = 120 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ .

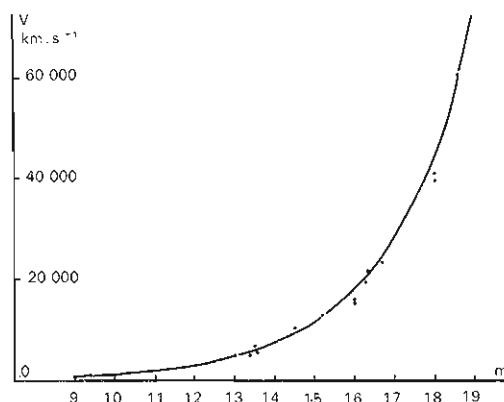


Fig. 2

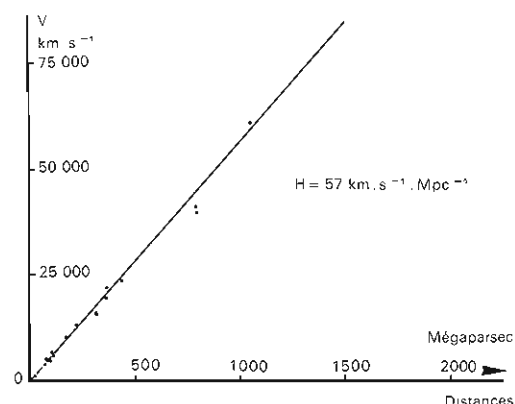


Fig. 3

Fig. 2. — Variation de la vitesse d'éloignement des galaxies avec la magnitude apparente.

Fig. 3. — Mêmes données que la figure 2 mais on a porté en abscisse la distance calculée de ces galaxies en admettant qu'elles ont une magnitude absolue de  $-21,5$ .

Je désire attirer l'attention sur l'importance fondamentale de la valeur admise pour l'éclat intrinsèque de ces galaxies. L'échelle de l'univers et corrélativement la constante de Hubble en dépendent. Hubble lui-même avait admis une échelle de l'univers qui donnait  $H = 540$ . Cette valeur a ensuite été réduite à  $300 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ . La valeur aujourd'hui généralement admise est encore beaucoup plus petite :  $H = 60$  mais l'incertitude reste grande. Suivant les auteurs,  $H$  est compris entre 40 et 100. Tout récemment, on a mis en évidence une asymétrie de l'espace,  $H$  prenant la valeur de 50 dans certaines régions du ciel, et 100 dans d'autres. Cette asymétrie ne se retrouve pas du tout dans le rayonnement cosmologique à 3K. Cette asymétrie a été récemment rejetée par les auteurs même de la découverte. Elle s'explique par un mouvement d'ensemble du groupe local de galaxies, dont fait partie la nôtre dans la direction de l'anticentre avec une vitesse de  $450 \text{ km s}^{-1}$ . L'asymétrie de l'espace disparaît lorsqu'on tient compte de ce mouvement propre.

Il ne m'est pas possible d'expliquer en détail l'expansion de l'Univers, d'abord parce que je ne suis pas un spécialiste de cette question ardue et qu'elle demanderait aussi un exposé trop long.

Cette étude est l'objet de la Cosmologie. Tous les modèles modernes d'Univers s'appuient naturellement sur la théorie de la relativité généralisée, et en général, les astronomes

s'accordent pour admettre que l'Univers réel correspond à un modèle de Friedmann à constante cosmologique  $\Lambda$  nulle et à pression nulle mais en expansion avec explosion primordiale. Le taux actuel d'expansion est mesuré au point où nous sommes et à l'époque actuelle par la constante  $H$  de Hubble. Mais cette constante est variable avec le temps et on pense généralement qu'elle diminue actuellement.

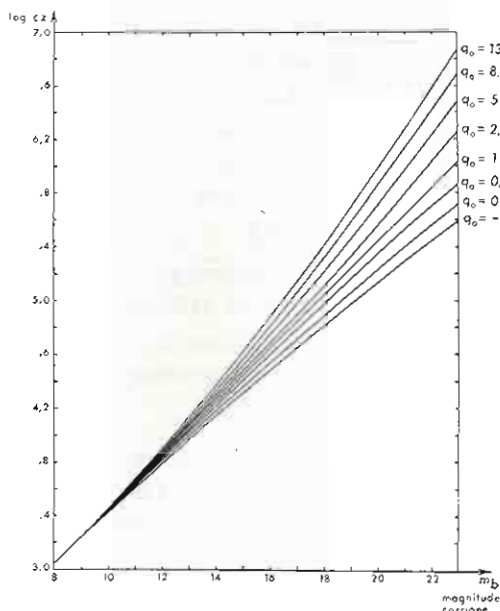


Fig. 4

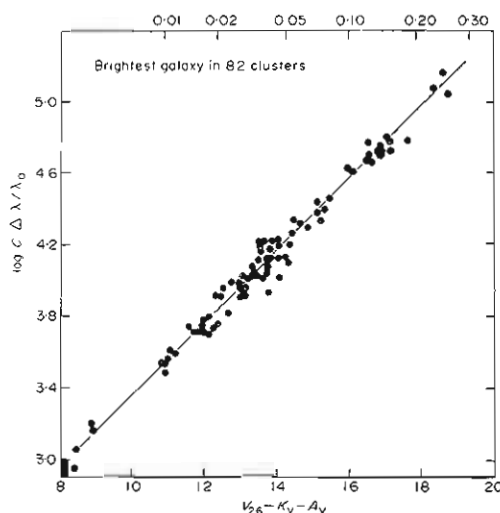


Fig. 5

Fig. 4. — Représentation schématique de l'expansion de l'Univers d'après Sandage suivant divers modèles d'Univers. On a représenté en abscisse la magnitude apparente, en ordonnée  $\log cz$ , qui est confondu avec  $\log V$  pour les petites vitesses d'éloignement  $V$  (voir le texte pour les détails).

Fig. 5. — Valeurs observées par Sandage, représentées comme dans le graphique de la figure 4 dont l'auteur déduit  $q_0 = 1 \pm 0.5$ .

Son inverse  $T = 1/H$  mesure un temps; à  $H = 60$  correspond  $T = 17$  milliards d'années. Avec une expansion décélérée, telle qu'on pense l'observer, ceci est une valeur supérieure de l'âge de l'univers.

Allan Sandage a consacré pratiquement ces dernières années de recherches à ce problème à l'aide du télescope de 5 m du Mont Palomar et d'un instrument installé au Chili pour essayer de trouver à quel modèle cosmologique correspond notre Univers réel.

Parmi quelques méthodes essayées, la plus prometteuse est la suivante :

On essaye de confronter la variation de la vitesse radiale avec la magnitude observée aux valeurs théoriques calculées à l'aide de divers modèles cosmologiques.

Mais : 1° on s'affranchit d'abord de toute idée préconçue et on ne parle plus que de déplacements spectraux : la longueur d'onde observée  $\lambda$  est représentée en fonction de la longueur d'onde émise  $\lambda_0$  par la formule :

$$\lambda = \lambda_0 (1 + z).$$



Pour les petites valeurs de  $z$  et quel que soit le modèle adopté

$$V = cz;$$

2° la magnitude  $m$  observée doit être corrigée de deux effets. Toutes les radiations sont rougies par le déplacement spectral et l'énergie est diluée dans un espace en expansion alors toutes les cosmologies montrent que l'éclat doit être divisé par  $(1+z)^2$ .

Une autre correction doit être faite parce que nous observons à travers l'atmosphère, de sorte que l'énergie reçue est diminuée et cela surtout pour les nébuleuses très rougies. On applique aux magnitudes observées les deux corrections correspondantes. Si on reporte sur un graphique  $\log cz$  en fonction de  $m_{\text{corr}}$ , on obtient le faisceau de courbes théoriques de la figure 4. Les valeurs  $q_0 = 1/2$  correspondent à un modèle euclidien et séparent les modèles hyperboliques ( $q_0 < 1/2$ ) et elliptiques ( $q_0 > 1/2$ ). Seul  $q_0 = 1$  correspond à une droite. Sandage déduit de ses observations, données par la figure (5) :  $q_0 = 1 \pm 0.5$ .

Pour les nébuleuses classiques, on constate d'abord que la pente au voisinage de l'origine a bien la valeur théorique  $1/5$ . L'ordonnée à l'origine permet de calculer  $H$ . Malheureusement pour les grandes valeurs de  $m$ , la dispersion est assez grande mais Sandage conclut que la valeur de  $q$  qui permet de calculer la variation  $dH/dt$  est probablement comprise entre 0,5 et 1,5.

Seule, la valeur  $q = -1$ , du modèle stationnaire de Hoyle, paraît éliminée. Ce modèle n'est d'ailleurs pas un modèle de Friedmann. Depuis, quelques nouvelles galaxies ont été mesurées avec  $z = 0,7$ . Mais les conclusions provisoires de Sandage restent toujours valables.

D'après cet exposé sur les galaxies normales, vous constatez que la question la plus simple : quelle est la distance de la plus faible galaxie que vous avez observée ? ne comporte pas de réponse car nous ne savons pas quelle est la géométrie de notre Univers. D'ailleurs cette question a-t-elle réellement un sens pour les grandes distances ? Je signalerai à mes confrères que cette question intéresse l'excellent livre de H. Andriolat<sup>(2)</sup>.

D'autres collègues vous exposeront le cas des galaxies anormales à noyaux explosifs, comme les galaxies de Seyfert ou de Markarian, ou les quasars pour lesquels on a observé des valeurs de  $z$  allant jusqu'à  $z = 4,9$ . La raie de Lyman  $L_\alpha$  située normalement à  $\lambda_0 = 1\,215 \text{ \AA}$  est alors observée à  $7\,150 \text{ \AA}$ .

Si on essaye de placer les valeurs  $\log cz$  en fonction de  $m$  pour ces galaxies, les points sont absolument dispersés, ce qui s'explique si on admet que ces galaxies ont des éclats très différents les uns des autres et qu'elles sont 100 ou 1 000 fois plus lumineuses qu'une galaxie normale. Ceci permet de reculer les limites de l'univers observé mais sans que nous puissions jamais atteindre la distance de 17 milliards d'années de lumière dans le modèle admis en ce moment ou des distances beaucoup plus grandes si on n'admet pas l'explosion primordiale et donc un modèle d'univers différent.

(1) Ch. FEHRENBACH, *Comptes rendus*, 284, Vie Académique, 1977, p. 60.

(2) H. ANDRIOLAT, *Introduction à l'étude des cosmologies*, Armand Colin, 1970.