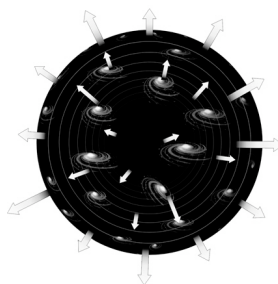
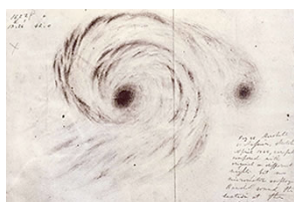


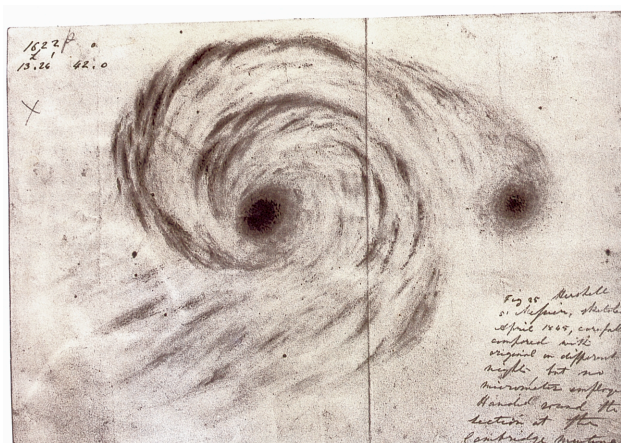
HISTOIRES DE « SPIRALES »

De Lord Rosse (1845) à Lemaître et Hubble (1925-1931)

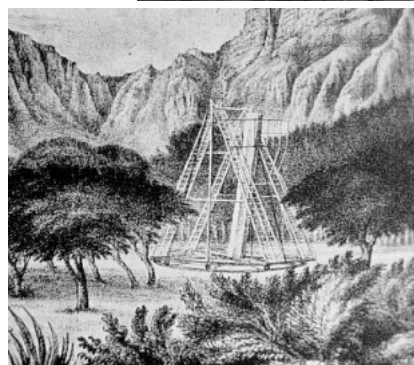
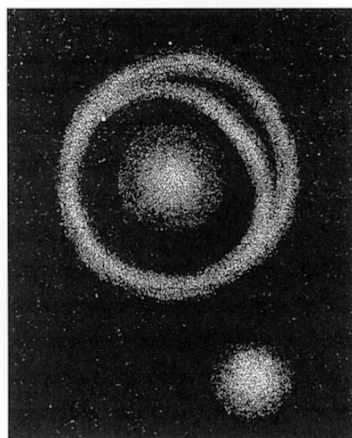


Festival d'astronomie de Fleurance
Août 2009
Frédéric Chaberlot

Le premier dessin d'une « nébuleuse » spirale:
M51 par Lord Rosse en 1845



John Herschel en 1833

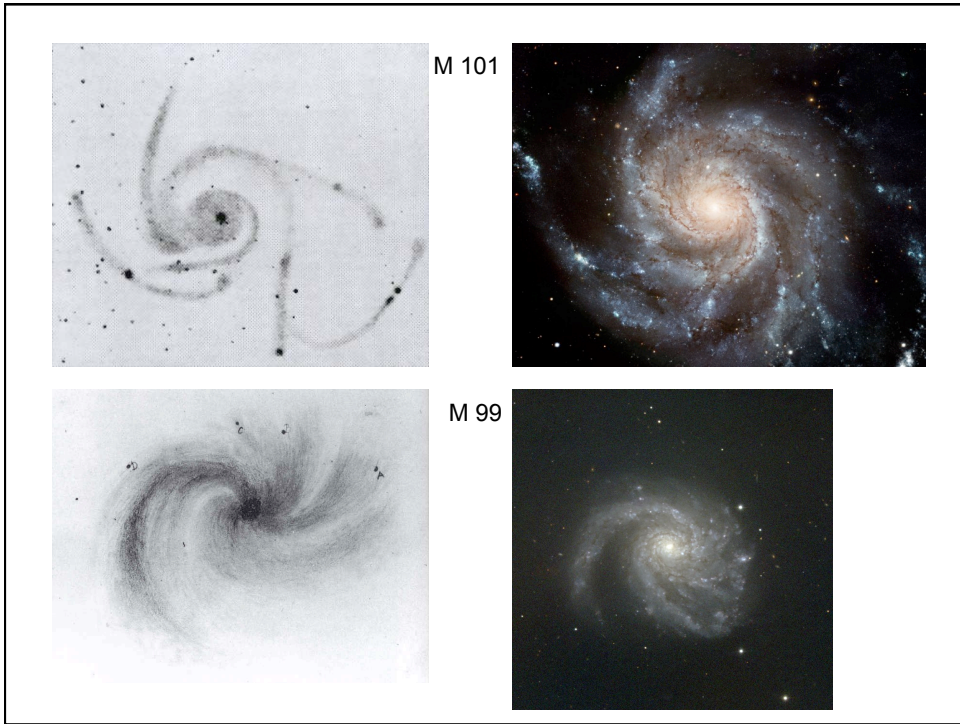


« Observations of Nebulae and Clusters », *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, 1833

Autour de 1850: William Parsons, lord Oxmantown, third Comte de Rosse (Ireland)



« Observations of some of the Nebulae », *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, 1844
« Observations of the Nebulae », *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, 1850

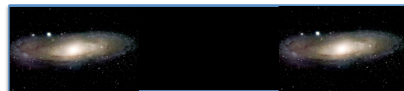
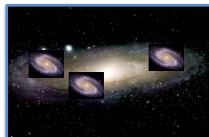


Quel est le statut des « spirales »?

- Gaz, poussières, étoiles ?
- Dimensions, distances ?

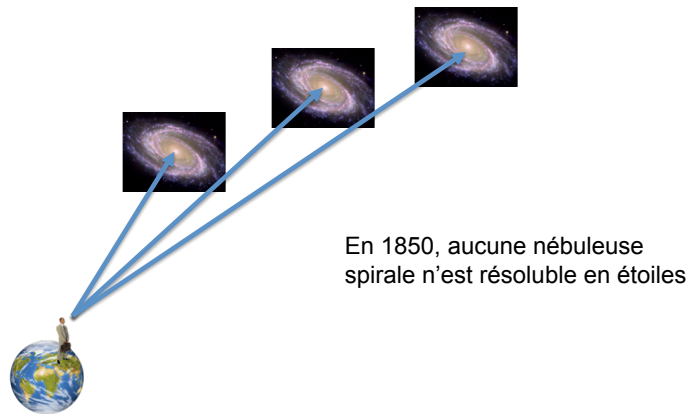


- Intra- ou extra-galactiques ?

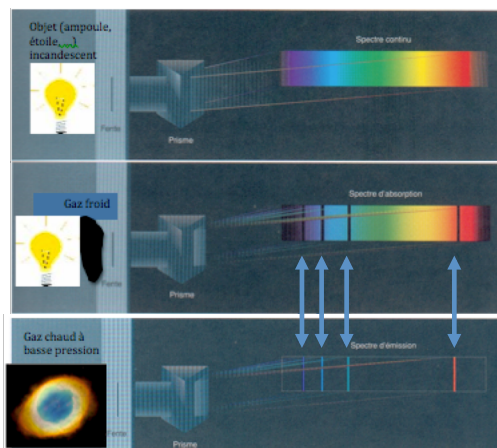


En 1850 : MYSTERE

Distinguer le contenu stellaire ?



Une révolution : la spectroscopie astro – nomie → astro - physique

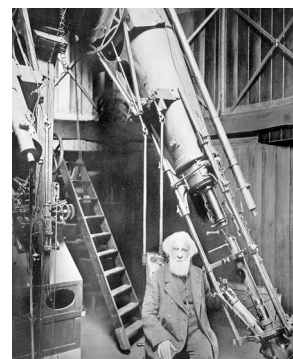
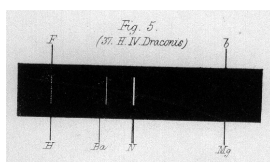
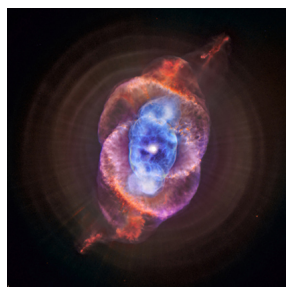


Les trois lois de Kirchhoff pour la spectroscopie

1864 William Huggins

« On the Spectra of some of the Nebulae »,
Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., 1864

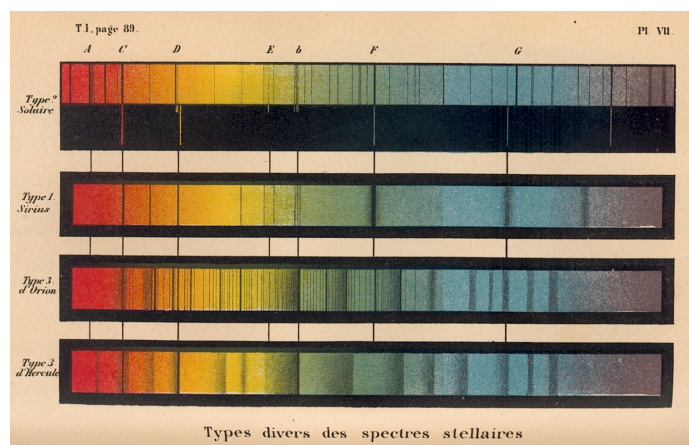
Spectre de la
 « nébuleuse planétaire »
 « Œil de Chat »



Idem avec 7 autres nébuleuses planétaires

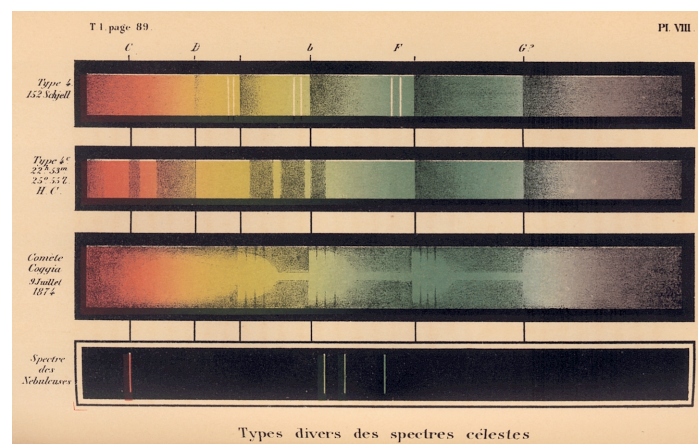
→ Les nébuleuses planétaires sont gazeuses !

Spectres d'étoiles



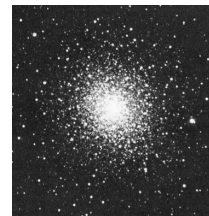
Tiré de: Padre Angelo Secchi, *Les Etoiles*, 1878-1879

Spectres d'étoiles, de comètes et des nébuleuses planétaires



Et les amas globulaires ? → Huggins avec M92

« Un faible spectre similaire à celui d'une étoile. »



Et les nébuleuses spirales ?

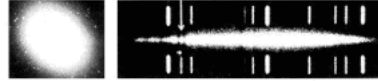
→ Huggins avec M31, 32, 51, 63, 81, 82

« Les spectres sont apparemment continus. »

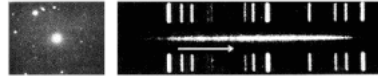
Mais:

« Je ne peux pas être certain que ces spectres continus sont interrompus par des lignes noires, comme ceux du Soleil et des étoiles, car [...] ces spectres sont extrêmement faibles et difficiles à examiner. »

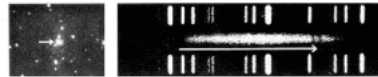
Après 1900 : V.M. Slipher (1910-1920)



→ Les nébuleuses spirales ont un contenu stellaire = nébuleuses blanches



≠ nébuleuses planétaires ont un contenu essentiellement gazeux = nébuleuses vertes



→ Les nébuleuses spirales sont situées très loin de nous, puisqu'on ne peut pas distinguer leur contenu stellaire.

Mais que signifie « très loin » ?

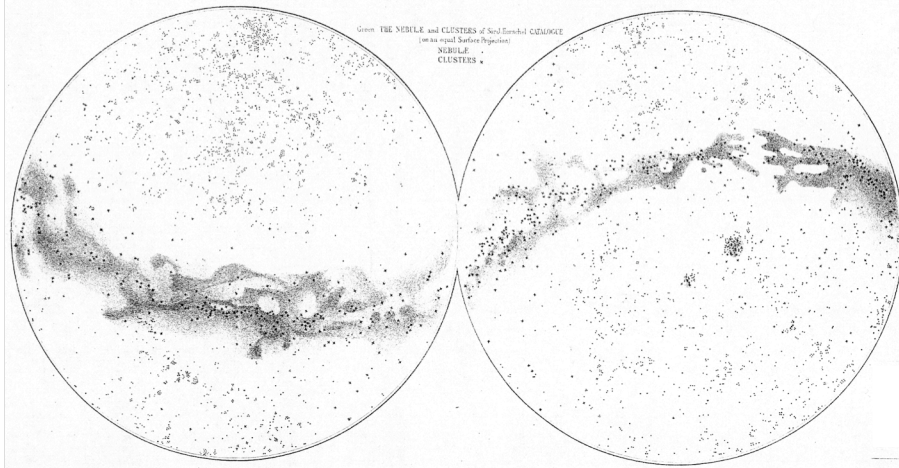
1900 – 1925 : le problème de la distance et du statut des nébuleuses spirales reste entier

1905, A. Clerke, *The System of the Stars* :

“La question de savoir si les nébuleuses sont des galaxies extérieures ne demande plus de longues discussions. Le progrès de la recherche y a répondu. Nous pouvons dire en toute sécurité qu'avec toutes les preuves disponibles devant lui, aucun penseur compétent ne peut désormais soutenir que les nébuleuses sont des systèmes d'étoiles de même rang que la Voie lactée. »



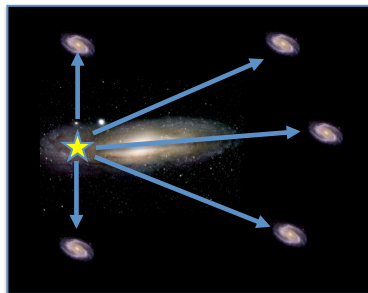
Le problème de la « zone d'absence »



S. Waters : « The Distribution of the Clusters and Nebulae », *MNRAS*, 1873

Explication moderne de la zone d'absence (depuis 1930):

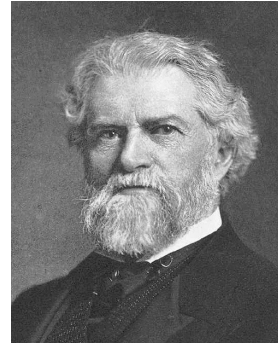
Les gaz et poussières contenus dans le plan galactique masquent les objets situés derrière.



Mais 1850 – 1930: les astronomes ne sont pas convaincus de la réalité de l'extinction interstellaire

- d'autres explications de la zone d'absence sont proposées, notamment celle d'une connexion amas globulaires – Voie lactée et d'une connexion nébuleuses spirales – Voie lactée

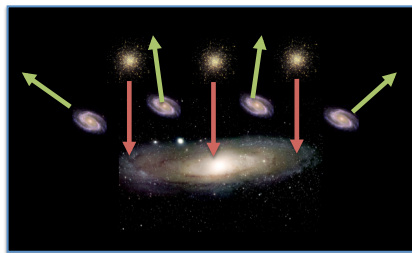
Avant 1900 : Une représentation de l'Univers visible



Tiré de : S. Newcomb et R. Engelmann, *Populäre Astronomie*, 1881

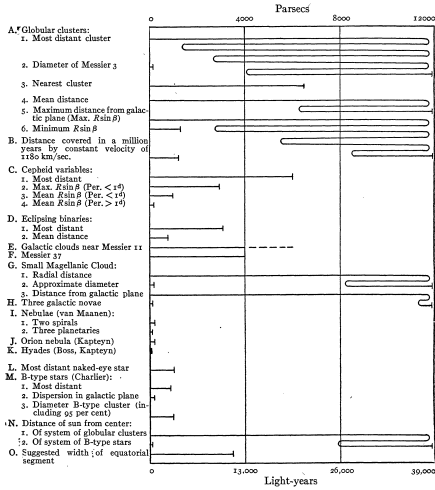
L'explication de Shapley (1917)

Hypothèse de « l'impossibilité dynamique » (pour les amas globulaires) et
Hypothèse de « la force répulsive » (pour les nébuleuses spirales)



Shapley : « Studies based on the colors and magnitudes in stellar clusters, 7th paper: the distances, distribution in space and dimensions of 69 globular clusters », *Contr. Mt. Wilson Obs.*, dec.1917

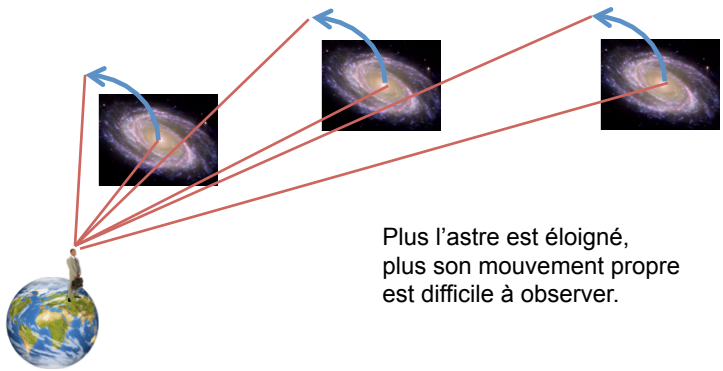
Shapley et la détermination des distances des amas globulaires

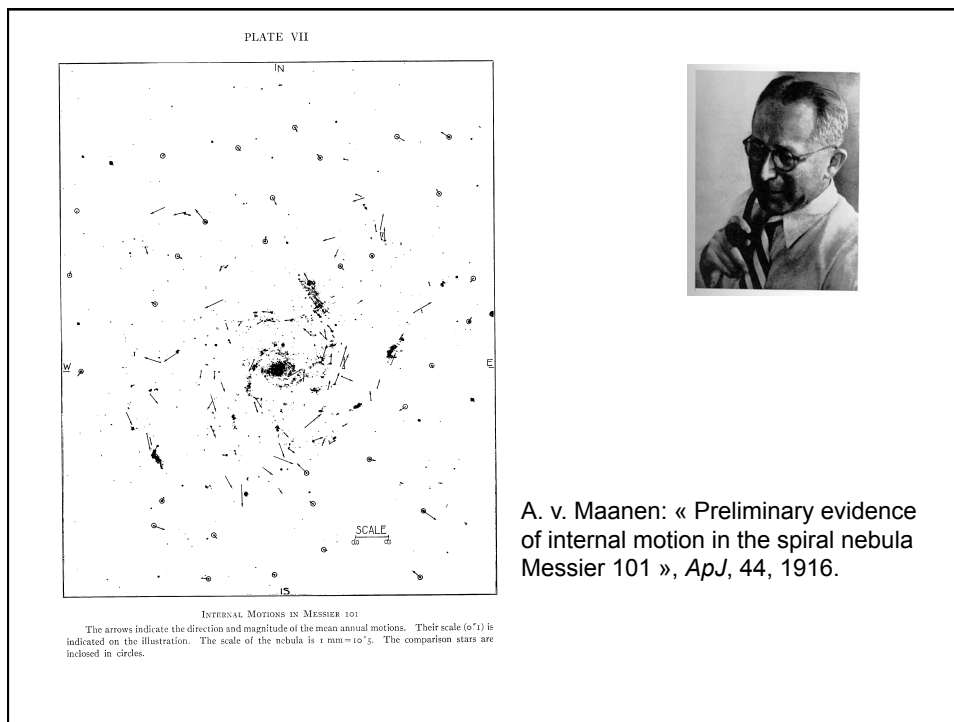


Shapley : « Studies based on the colors and magnitudes in stellar clusters, 11th paper: a comparison of the distances of various celestial objects », *ApJ*, 49, 1919

1916: A. van Maanen

Détection de mouvements propres dans M 101 ?





- Pour A. van Maanen, les spirales se déroulent.



- Pour Slipher (1917, effet Doppler spectroscopique), les spirales s'enroulent.
- A. van Maanen a-t-il vraiment détecté des mouvements propres dans des nébuleuses spirales ? Non, sans-doute. Mais la controverse a duré jusqu'en 1935.

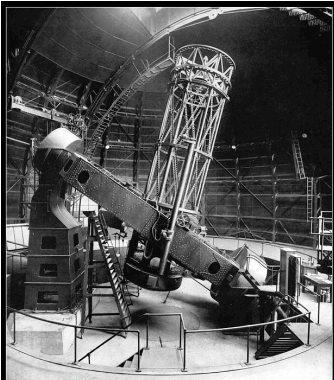
Vers une détermination convaincante de la distance des nébuleuses spirales

- Vitesse (Slipher $\approx 1910 - 1920$)
- Novae (Ritchey et Curtis ≈ 1917)
- Céphéides (Hubble 1925)

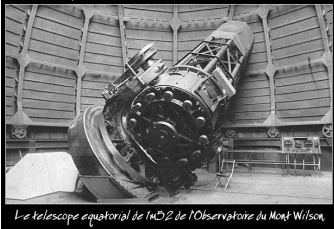
Les observatoires américains ≈ 1900



Mount Wilson Observatory



Le télescope Hooker de 2m50 de l'Observatoire du Mont Wilson.



Le télescope équatorial de 1m50 de l'Observatoire du Mont Wilson.



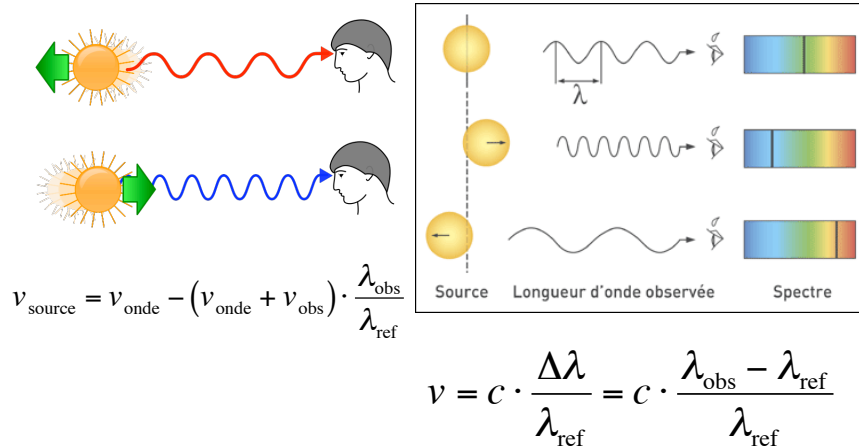
V. M. Slipher 1910 - 1920



Lowell Observatory



L'effet Doppler spectroscopique



Vitesses des nébuleuses spirales

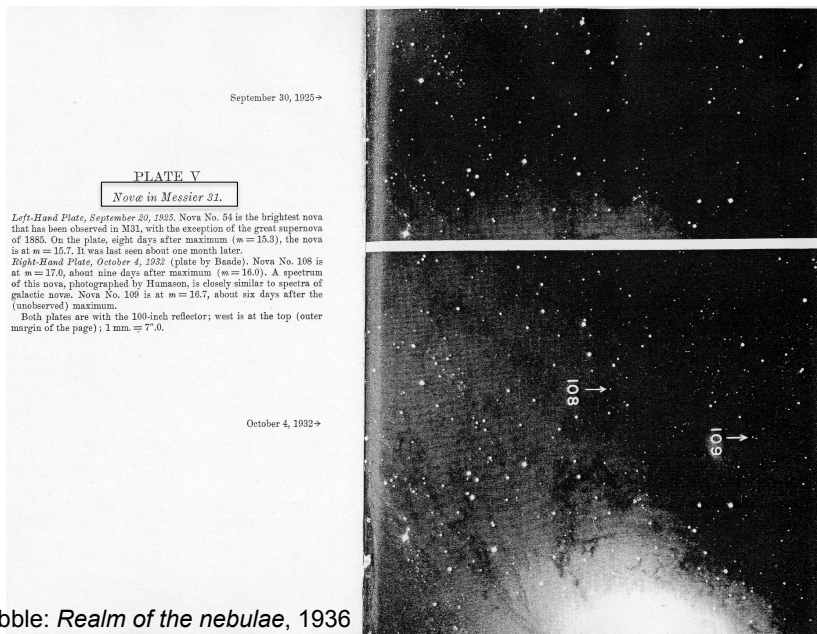
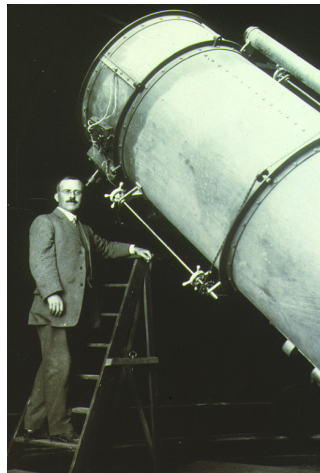
		Mesure de Slipher	Mesure récente
M 31	NGC 224	- 300 km/s	- 275 km/s
M 33	NGC 598	- 260 km/s	- 190 km/s
M 81	NGC 3031	- 30 km/s	+ 80 km/s
M 82	NGC 3034	+ 290 km/s	+ 400 km/s
M 83	NGC 5236	+ 500 km/s	+ 320 km/s
M 51	NGC 5194	+ 270 km/s	+ 550 km/s
M 87	NGC 4486	+ 800 km/s	+ 1220 km/s
M 104	NGC 4594	+ 1100 km/s	+ 1050 km/s

Strömberg, « Analysis of radial velocities of globular clusters and non-galactic nebulae », *ApJ*, 61, 1925.

- Les nébuleuses spirales ont des vitesses élevées.
- La plupart des nébuleuses spirales s'éloignent de la Voie lactée.

Ritchey et Curtis 1917

Découvrent des « novae » dans plusieurs nébuleuses spirales, dont M31 et M100.



Hubble: *Realm of the nebulae*, 1936

Curtis évalue la distance des nébuleuses spirales à au moins 3 millions d'année-lumière.

« Si nous faisons l'hypothèse que la magnitude absolue des novae galactiques est la même que celle des novae observées dans les nébuleuses spirales, alors [...] ces dernières sont 100 fois plus éloignées que les premières. »

Curtis: « Novae in spiral nebulae and the island universe theory », *PASP*, 29, 1917.

26 avril 1920: le grand débat

Il s'agit d'une discussion publique entre Shapley et Curtis, pour la réunion annuelle de la National Academy of Science, à Washington. Dans les années 1960, les astronomes et historiens surnommèrent cette discussion « le grand débat ».

Shapley	Curtis
La Voie lactée n'est pas héliocentrique et son diamètre est d'environ 300'000 a.l. (modèle de Shapley).	La Voie lactée est héliocentrique et son diamètre est d'environ 50'000 a.l. (modèle de Kapteyn).
Les nébuleuses spirales sont de petites tailles et relativement proches (mesures de van Maanen).	Les nébuleuses spirales ont des tailles comparables à la nôtre et en sont très éloignées (mesures de Curtis).

Curtis, Shapley: « The scale of the universe », *Bulletin of the National Research Council*, mai 1921.

Les Céphéïdes

Etoiles variables de type δ
Cephei découvert en 1784

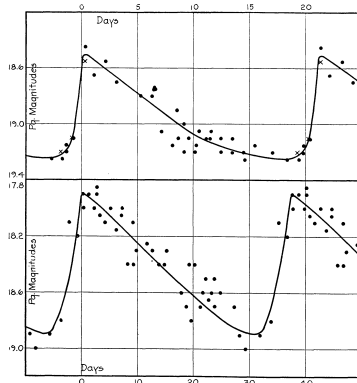


FIG. 1.—Light curves for two Cepheids in N.G.C. 6822. Upper curve, variable No. 6. Period 21.06 days; range 18.5–19.25. Lower curve, variable No. 2. Period 37.45 days; range 17.9–18.9. The three crosses on the rising slope of the upper curve represent observations on successive days and illustrate the rapid brightening of the variables.

Hubble: « NGC 6822, a remote stellar system », *ApJ*, 62, 1925.

Relation période – luminosité:

Plus une céphéïde est lumineuse (en moyenne), plus sa période de variation est longue.

Les Céphéïdes → critère de distance

- Déterminer par observation la luminosité apparente moyenne et la période de variation.
- Déterminer la luminosité intrinsèque moyenne grâce à la relation P – L.
- Déterminer la distance de la Céphéïde grâce au module de distance: $m - M = 5 \cdot \log_{10} d - 5$.

Les Céphéïdes: la relation P – L Shapley (1917)



Henrietta Leavitt
1908



Ejnar Hertzsprung

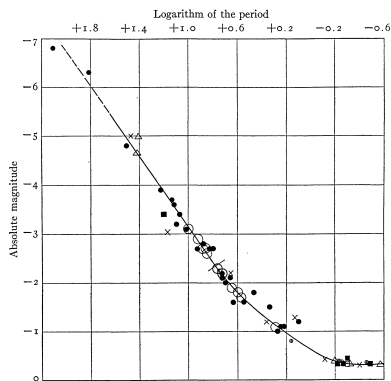


FIG. 1.—Luminosity-period curve of Cepheid variation. The various symbols designate variables from seven different systems. The short bisecting line at absolute magnitude -2.35 , log. period 0.775 , indicates the mean values for Cepheids of known proper motion. Most of the symbols for periods less than a day represent averages of about ten variables. Of the six largest deviations, four refer to values of particularly low weight. Table XI contains co-ordinates of the adopted curve.

Shapley : « Studies based on the colors and magnitudes in stellar clusters, 6th paper: on the determination of the distances of globular clusters », *ApJ*, 48, 1918



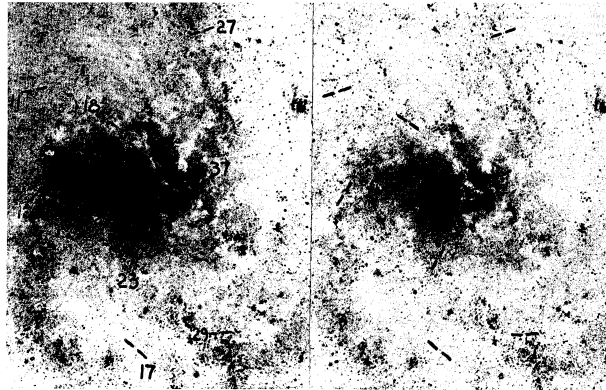
Edwin Hubble



À gauche, Hubble et Einstein réunis pour une observation.

Hubble: 1925 – 1929: Céphéïdes dans NGC 6822, M 31 et M 33

PLATE XVII



Light-Changes of Variables in Messier 33. Negatives H 446 (left) and H 475 (right), both made with the 100-inch reflector. Scale, 1 mm = 5". All of the variables except No. 21 are Cepheids.

Hubble: « A spiral nebula as a stellar system, M 33 », *ApJ*, 63, 1926.

Hubble: hypothèses

« Les résultats reposent sur trois hypothèses majeures:

- (1) les variables sont vraiment liées aux spirales
- (2) il n'y a pas beaucoup d'absorption due à des nébulosités amorphes dans les spirales
- (3) la nature de la variation des variables est uniforme dans la partie observable de l'univers. »

Hubble: « Cepheids in spiral nebulae », *the Observatory*, 48, 1925.

Hubble: conclusions

« La présente investigation identifie NGC 6822 comme un système d'étoiles et de nébuleuses isolé, de même type que les Nuages de Magellan, bien qu'un peu plus petit et beaucoup plus lointain. »

Hubble: « NGC 6822, a remote stellar system », *Apl*, 62, 1925.

Idem pour M 33 (en 1926) et M 31 (en 1929).

	Mesure de Hubble	Mesure récente
NGC 6822 (galaxie de Barnard, groupe local)	700'000 al	1'800'000 al
M 31 (galaxie d'Andromède)	900'000 al	2'000'000 al
M 33 (galaxie du Triangle)	850'000 al	3'000'000 al

Le problème de la mesure des distances

Les mesures de Hubble sont plus de deux fois inférieures aux mesures actuelles.

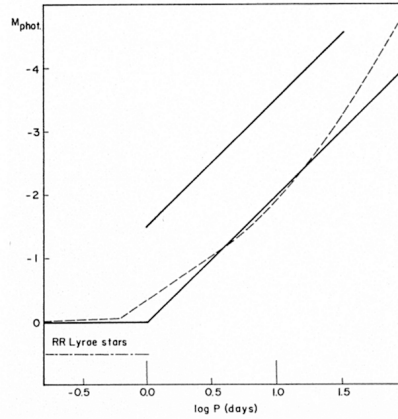
→ L'hypothèse (2: extinction interstellaire) n'est pas valable.

→ L'hypothèse (3: uniformité de la relation $P - L$) non plus.

1940 – 1960: W. Baade et les populations stellaires

→ L'unique classe des Céphéïdes est divisée en quatre:

- type I: δ Cephei
- type II: W Virginis
- RR Lyrae I et II.



Struve O, Zeberg V: *Astronomy of the 20th Century*, 1962



La découverte de l'expansion de l'Univers

PLATE VIII
The Velocity-Distance Relation.

The five examples in the Plate illustrate the empirical law that red-shifts in the spectra of nebulae increase with the apparent faintness of the nebula. Since apparent faintness measures distance, the law can be stated in the form that red-shifts increase with distance. Detailed investigation shows that the relation is linear (red-shifts = constant \times distance).

Red-shifts resemble velocity-shifts, and no other satisfactory explanation is available at the present time: red-shifts are due either to actual motion of recession or to some hitherto unrecognized principle of physics. Therefore, the empirical law is generally described as the *velocity-distance relation* (velocity = constant \times distance), and is often considered as visible evidence of the expanding universe of general relativity. The spectra are by Hubble. The velocity of NGC 221 is negative—toward the earth—and is a reflection of the sun's motion in its orbit about the center of the galactic system. The other velocities are positive—away from the earth. The distance of NGC 221 (M32) should read 760,000 light years. The revision takes into account the effects of local obscuration.

	VELOCITY	DISTANCE
NGC 221	125 miles per second	900,000 light years
NGC 4473	1,400 miles per second	7,000,000 light years
NGC 379	3,400 miles per second	23,000,000 light years
Nebula in Ursa Major Cluster	9,400 miles per second	85,000,000 light years
Nebula in Gemini Cluster	14,300 miles per second	135,000,000 light years

The arrows above the nebular spectra point to the H and K lines of calcium and show the amounts these lines are displaced toward the red end of the spectra. The comparison spectra are of helium.

The direct photographs (on the same scale and with approximately the same exposure times) illustrate the decrease in size and brightness with increasing velocity or red-shift.

NGC 4473 is a member of the Virgo cluster and NGC 379 is a member of a group of nebulae in Pisces.

Hubble: *Realm of the nebulae*, 1936

La loi de Hubble... $V = H \cdot d$

... découverte par De Sitter (1917) et surtout par Lemaître (1927) puis redécouverte par Hubble (1929).

Lemaître: $H = 471 \text{ km/s/Mpc}$ Hubble: $H \approx 500 \text{ à } 560 \text{ km/s/Mpc}$

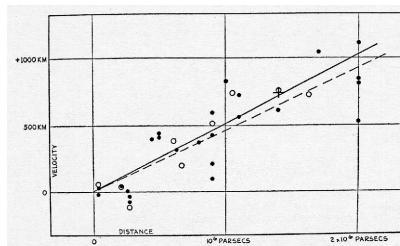


FIG. 9. The Formulation of the Velocity-Distance Relation.

The radial velocities (in km/sec.), corrected for solar motion, are plotted against distances (in parsecs) estimated from involved stars and, in the case of the Virgo cluster (represented by the four most distant nebulae), from the mean luminosity of all nebulae in the cluster. The black disks and full line represent a solution for the solar motion using the nebulae individually; the circles and dashed line, a solution combining the nebulae into groups.

Hubble: *Realm of the nebulae*, 1936

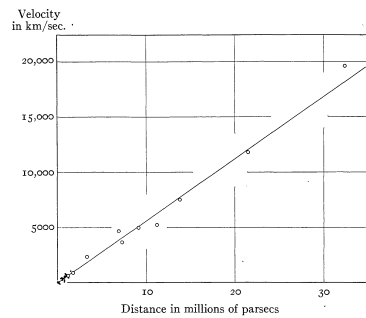
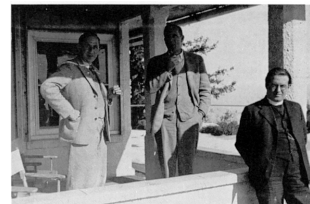


FIG. 5.—The velocity-distance relation. The circles represent mean values for clusters or groups of nebulae. The dots near the origin represent individual nebulae, which, together with the groups indicated by the lowest two circles, were used in the first formulation of the velocity-distance relation.

Hubble: « The velocity-distance relation among extra-galactic nebulae », *ApJ*, 74, 1931.

L'interprétation du redshift

- En 1927, Lemaître interprète le redshift des galaxies spirales dans le cadre de la relativité générale: la métrique de l'Univers est en expansion.
- A l'époque, Lemaître est le seul à prôner cette interprétation. Ni Einstein ni Hubble n'y croyaient.



L'âge de l'Univers

- L'inverse de la valeur de H donne une idée de l'ordre de grandeur de l'âge de l'Univers.
- Avec $H \approx 500 \text{ km/s/Mpc}$ (Lemaître - Hubble), l'âge de l'Univers ≈ 2 milliards d'années.
- Mais à l'époque, on savait déjà grâce aux études sur la radioactivité que l'âge de la Terre était d'environ 4 milliards d'années...
- Dans les années 1950, suite aux travaux de W. Baade et A. Sandage sur les distances extra-galactiques, la valeur de H fut réduite et donc l'âge de l'Univers augmenté.
- Actuellement, $H \approx 60 \text{ km/s/Mpc}$ et âge $\approx 15 \text{ Ga}$.

Bibliographie succincte

- Berendzen R., Hart R. & Seeley D.: *Man discovers the galaxies*, Columbia University Press, 1983.
- Chaberlot F.: *La Voie lactée, histoire des conceptions et des modèles de notre galaxie, des temps anciens aux années 1930*, CNRS éditions, 2003.
- Luminet J.-P.: *L'invention du Big Bang*, éditions du Seuil, 2004.