

À l'aube de la découverte de l'expansion de l'Univers

Les premières mesures de la vitesse radiale des nébuleuses spirales par Vesto Slipher (1912-1925)

At the Beginnings of the Discovery of an Expanding Universe: First Measurements of Radial Velocities of Spiral Nebulae by Vesto Slipher (1912-1925)

Alain Brémond et Hugues Chabot



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/histoiremesure/1752>
DOI : 10.4000/histoiremesure.1752
ISSN : 1957-7745

Éditeur

Éditions de l'EHESS

Édition imprimée

Date de publication : 1 décembre 2006
Pagination : 157-186
ISBN : 2-7132-2095-5
ISSN : 0982-1783

Référence électronique

Alain Brémond et Hugues Chabot, « À l'aube de la découverte de l'expansion de l'Univers », *Histoire & mesure* [En ligne], XXI - 2 | 2006, mis en ligne le 01 décembre 2009, consulté le 02 juin 2022. URL : <http://journals.openedition.org/histoiremesure/1752> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/histoiremesure.1752>

Alain Brémond & Hugues Chabot *

**À l'aube de la découverte de l'expansion de l'Univers.
Les premières mesures de la vitesse radiale des nébuleuses spirales
par Vesto Slipher (1912-1925) ****

Résumé. Des mesures ont été, au début du xx^e siècle, à l'origine d'un changement de vision de l'univers chez les astronomes. D'abord considéré comme tout entier contenu dans la Voie lactée, l'univers s'élargit en 1755 aux univers-îles suggérés par Kant. L'astronome américain Vesto Slipher, en mesurant dès 1913 les vitesses radiales des nébuleuses spirales, montre que ces objets sont probablement indépendants des autres objets célestes qui, eux, forment la galaxie. Ces travaux, très vite acceptés par les astronomes, ne mettent pas un terme à la polémique au sujet des nébuleuses spirales. Cependant, ils sont utilisés par les premiers cosmologistes théoriciens, en particulier Willem De Sitter et Georges Lemaître, à l'appui de leurs hypothèses et de leurs calculs.

Abstract. At the Beginnings of the Discovery of an Expanding Universe: First Measurements of Radial Velocities of Spiral Nebulae by Vesto Slipher (1912-1925). Measurements were at the birth of new ideas about the universe. At first considered as entirely held into the Milky Way, the universe enlarged into island-universes as suggested by Kant in 1755. The American astronomer Vesto Slipher, measuring radial velocities of spiral nebulae in 1913 showed that these objects were probably independent from the other celestial objects, which form the Galaxy. His determinations of radial velocities, soon accepted by the astronomers, did not resolve the polemics about spiral nebulae. Nevertheless the first cosmologists and theoreticians, such as Willem De Sitter and Georges Lemaître, used them as a support to their hypotheses and their calculations

* Université Claude Bernard Lyon 1, LIRRDHIST, Domaine Universitaire de La Doua, 69 110 — Villeurbanne, France.

E-mail : alain.bremond@neuf.fr et hugues.chabot@univ-lyon1.fr

** Nos plus vifs remerciements vont à Georges Paturel, astronome à l'observatoire de Lyon et à Antoinette Beiser, archiviste du Lowell Observatory, Flagstaff, Arizona.

L'utilisation de télescopes par les astronomes leur a permis de découvrir, à côté des planètes, des comètes et des étoiles, des objets flous qu'ils nomment nébuleuses ¹. Au XVIII^e siècle, Emmanuel Kant (1724-1804) suggère qu'il pourrait s'agir d'ensembles d'étoiles, identiques à notre propre système appelé la Voie lactée (galaxie), et qu'après lui on appelle des « univers-îles » ². Pour d'autres, comme Pierre-Simon de Laplace (1749-1827), les nébuleuses pourraient constituer des systèmes solaires en formation. En effet, dans son *Exposition du système du monde* ³, il décrit la naissance du système solaire à partir d'une masse de matière qui se met en rotation, se condense en anneaux, puis se fragmente ⁴. En lisant les observations de William Herschel (1738-1822), qui décrit certaines nébuleuses possédant un centre plus brillant, Laplace en déduit que le phénomène peut être général : « Dans d'autres nébuleuses, ces noyaux brillent davantage relativement à la nébulosité qui les environne ». Et plus loin : « Les nébuleuses, classées d'après cette vue philosophique, indiquent avec une extrême vraisemblance leur transformation future en étoiles ».

Pour sa part, William Herschel avait recensé plusieurs milliers de nébuleuses. À la fin de sa vie, faisant le point sur ces objets, il reconnaissait que toutes n'étaient pas résolubles en étoiles, malgré son télescope de 40 pieds de focale ⁵. Il fut cependant le premier à proposer un modèle d'univers, limité alors à la Voie lactée, dont le Soleil occuperait le centre. Plus tard, lord Rosse (1800-1867), qui utilise un télescope de 1,80 m de diamètre, le Léviathan, isole en 1844, parmi les objets nébuleux, un groupe particulier : les « nébuleuses spirales » ⁶. James Keeler (1857-1900), qui travaille à l'observatoire Lick, aux États-Unis, confirme ses observations ⁷. Des astronomes, encore peu nombreux, pensent que l'hypothèse des univers-îles devient de plus en plus plausible lorsqu'on observe la forme de ces spirales, surtout après la photographie prise en 1888 par Isaac Roberts (1829-1904),

1. L'abbé Georges Lemaître a analysé les différentes théories de Buffon, Kant et Laplace dans G. LEMAÎTRE, 1945 et 1946.

2. KANT, E., 1984 [1755].

3. Dans la dernière édition de 1835 (pp. 481-483) et dans la note VII qui l'accompagne (pp. 498-509). LAPLACE, P. S. de, 1878.

4. Sur la biographie et la genèse des travaux de Laplace, l'ouvrage de R. HAHN, 2004, est particulièrement intéressant, en particulier les pp. 114-121 sur *l'Exposition du système du monde*.

5. HERSCHEL, W., 1811, 1814, 1818.

6. PARSONS, C., 1926.

7. KEELER, J. E., 1908a.

qui montre la structure spirale de la Grande nébuleuse d'Andromède ⁸. L'astronome anglais William Huggins (1824-1910) propose en 1873 d'appliquer la spectroscopie à l'étude des déplacements possibles de ces objets, grâce aux découvertes de Christian Doppler (1803-1853) et Hippolyte Fizeau (1819-1896) ⁹. Il échoue dans sa tentative : il lui est impossible de mettre en évidence un décalage des raies spectrales, les objets étudiés présentant un très faible éclat.

En 1885 survient un événement surprenant : l'apparition d'une étoile nouvelle, une nova, dans la Grande nébuleuse d'Andromède ¹⁰. Les nébuleuses spirales contiendraient donc des étoiles ? Cette hypothèse se trouve renforcée lorsque les études montrent que leur spectre est tout à fait semblable à celui des étoiles, avec des raies sombres, raies d'absorption selon Kirchhoff (1824-1887) et Bunsen (1811-1899), alors que d'autres types de nébuleuses, plus diffuses, possèdent un spectre de raies colorées correspondant à des raies d'émission. Reste à franchir un saut qualitatif important, qui consiste à admettre que ces systèmes stellaires sont autant d'univers-îles, comme notre galaxie. L'état des connaissances en 1911 est bien résumé par les réflexions de Henri Poincaré (1854-1912), dans la préface de ses *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques* :

« Que sont les nébuleuses, en particulier les nébuleuses spirales ? Sont-elles à des distances énormes ; en dehors de la Voie Lactée, et sont-elles elles-mêmes des voies lactées vues de loin ? Ou bien, malgré la nature de leur spectre, sont-elles incapables d'être assimilées à des amas de vraies étoiles [...]. Un fait qui frappe tout le monde, c'est la forme spirale de certaines nébuleuses ; elle se rencontre beaucoup trop souvent pour qu'on puisse penser qu'elle est due au hasard. On comprend combien est incomplète toute théorie cosmogonique qui en fait abstraction. Or, aucune d'elle n'en rend compte d'une manière satisfaisante » ¹¹

C'est dans le premier quart du ^{xx}e siècle que la question est considérée comme tranchée, avec la mesure par Edwin Hubble (1889-1953), en 1924, de la distance des spirales proches ¹².

Bien que les travaux de Vesto Slipher (1875-1969) apparaissent dans l'historiographie comme un apport majeur dans un débat auquel participent de nombreux astronomes ¹³, plusieurs points restent selon nous en suspens,

8. ROBERTS, I., 1888.

9. HUGGINS, W., 1868 et 1873.

10. BACKHOUSE, T. W., 1888.

11. POINCARÉ, H., 1911.

12. HUBBLE, E. P., 1926.

13. Ils figurent en bonne place dans un article de D. FERNIE, 1970 comme dans les ouvrages

ou méritent un nouvel examen. Jusqu'à une date récente en effet, les archives de Vesto Slipher n'étaient pas classées et restaient donc difficilement accessibles ¹⁴. L'analyse des manuscrits et de la correspondance de Slipher, combinée avec celle de ses publications et des articles qui ont utilisé ou discuté ses résultats, permet de reconsidérer certains points importants. Les hypothèses que Slipher élabore doivent en particulier être présentées de façon plus fine, car elles évoluent avec le temps. En 1971, Hetherington présentait les points de vue de Willem De Sitter (1872-1934), de Campbell (1862-1938) et de Slipher sur les vitesses radiales des nébuleuses spirales de façon séparée ¹⁵. Il avançait que De Sitter n'avait connu ces travaux qu'en 1920, alors qu'il en a eu connaissance dès 1917, au moment où il publie son modèle d'univers. Il ne précisait pas quel rôle les mesures de Slipher avaient pu jouer dans la théorie de De Sitter ¹⁶. Il suggérerait en outre que la décision de Slipher de travailler sur les nébuleuses spirales aurait été due à une concurrence avec l'observatoire Lick et à des limitations d'ordre instrumental. Nous verrons que d'autres considérations ont aussi joué dans ce choix.

Compte tenu de nouveaux éléments mis en évidence par la consultation des archives de Slipher, il nous est donc apparu utile de reprendre une étude centrée sur sa découverte *princeps* et analysant précisément les controverses qui se développèrent d'abord sur les mesures, puis à propos de leur place dans la discussion sur la nature des nébuleuses spirales. Après avoir replacé les observations de Slipher dans le contexte de l'astronomie de son époque, nous présenterons les hypothèses que lui et d'autres astronomes en ont tirées. Nous situerons enfin la place de ces observations dans les travaux de cosmologie théorique de De Sitter et Lemaître (1894-1966). Notre étude est bornée par l'apparition dans ces travaux des données observationnelles de Hubble, parues en 1929. Notre propos est en effet ici d'étudier les résultats d'observation et leur utilisation, et non pas le débat sur la nature des nébuleuses spirales.

de R. BERENDZEN & *al.*, 1984, pp. 104-106, R. W. SMITH, 1982, pp. 17-22 et plus récemment M. J. CROWE, 1994.

14. L'inventaire des archives de l'observatoire Lowell est consultable sur <http://www.lowell.edu/Research/library/>, mais les documents ne sont pas numérisés.

15. HETHERINGTON, N. S., 1971.

16. Il n'existe pas non plus, à notre connaissance, d'étude à ce propos dans le cas de Georges Lemaître (1894-1966).

1. Vesto Slipher

Les années de formation

Vesto Slipher a fait ses études à l'université de Bloomington (Indiana)¹⁷. Nous avons examiné dans quelques manuels de l'époque ce qu'étaient les connaissances enseignées de 1900 à 1910 sur la question des nébuleuses, pour comprendre quelles pouvaient être ses connaissances théoriques. Le manuel de Charles A. Young (1837-1905), professeur d'astronomie à Princeton et à Bloomington, est paru en 1898¹⁸. La spectroscopie y est bien développée. C'est grâce à elle que les nébuleuses spirales sont séparées des amas stellaires, ainsi que des nébuleuses gazeuses. Les références sont les observations de Keeler et, pour leur description, le catalogue de Draper. Le manuel ne comporte plus aucune référence aux publications de Herschel. L'ouvrage de H. H. Turner (1861-1930), professeur d'astronomie à Oxford, fait le point sur les connaissances du moment (1901). Les nébuleuses occupent douze pages d'un livre qui en comporte 286. L'auteur estime que la photographie redresse les erreurs commises par certains dessinateurs de nébuleuses et apporte des précisions plus grandes, autorisant certaines hypothèses. C'est ainsi que, selon lui, les photographies de la nébuleuse d'Andromède confirment l'hypothèse nébulaire de Laplace :

« [...] et nous voyons ici en réalité dans le ciel l'état des choses que Laplace a suggéré dans sa fameuse Hypothèse Nébulaire - une nébuleuse centrale, qui, dans sa rotation, projette une série d'anneaux, dont quelques-uns se brisent pour former des satellites ». ¹⁹

Au contraire, la forme nettement spirale d'autres nébuleuses « suggère une histoire de leur développement plutôt différente ». À côté de ces spirales, il existe des nébuleuses diffuses gazeuses, comme vient de le montrer Huggins : la nébuleuse d'Orion par exemple.

Nous connaissons aussi la formation théorique et pratique dispensée aux étudiants de l'université d'Indiana, que Slipher a fréquentée, grâce à un étudiant qui termine ses études en 1905, donc quatre ans après Slipher²⁰. Il s'agit de John C. Duncan (1882-1962). Il nous apprend que la formation qui

17. Aucun ouvrage n'a été consacré à Slipher. Nous avons utilisé les articles biographiques de W. H. HOYT, 1980, J. S. HALL, 1970, l'ouvrage de W. LOWELL PUTNAM, 1994 et la monographie de R. HART & R. BERENDZEN, 1975.

18. YOUNG, C. T., 1898.

19. TURNER, H. H., 1901, p. 231. En dehors des ouvrages traduits, les citations ont été traduites par nous.

20. LANKFORD, J. & SLAVINGS, R. L., 1997.

conduit au *Master of Arts* comprend 28 heures de mathématiques, 30 heures de physique, avec une formation théorique et pratique de spectroscopie, ainsi que 42 heures d'astronomie, avec notamment la pratique des instruments d'observation et la photographie. Les archives de Vesto Slipher contiennent également le manuscrit de ses notes de cours, qui montrent une formation théorique sur trois mois en spectroscopie, donnée par Charles Young et conforme aux connaissances de l'époque. Ainsi, lorsque Slipher arrive à l'observatoire, il dispose déjà d'une formation initiale qui est censée permettre aux étudiants d'accéder aux premiers postes d'astronomes et d'être immédiatement actifs ²¹.

Son diplôme de *Bachelor of Arts* en poche, il est recruté par Percival Lowell (1855-1916), pour son observatoire personnel de Flagstaff (Arizona). Tout en continuant ses études universitaires ²², il travaille activement sous la tutelle de Lowell dans le domaine de la spectrographie, en particulier des planètes, son sujet favori. Lowell, riche industriel de Boston passionné d'astronomie, avait décidé de créer son propre observatoire pour poursuivre les études des canaux de Mars, suggérées par l'italien Schiaparelli ²³. Il s'intéresse à tout ce qui concerne le système solaire, en particulier à l'hypothèse nébulaire de Laplace, reprise et modifiée par Chamberlin (1843-1928) et Moulton (1872-1952) ²⁴. Des astronomes voient dans certaines nébuleuses spirales l'image possible d'un tel système, le noyau central représentant l'étoile et la partie périphérique le disque en rotation, dans lequel les « noyaux » plus denses vus sur les photographies pourraient correspondre à des planétésimaux.

Un projet conforme à la politique de l'observatoire, mais un travail original

Vesto Slipher rejoint en 1901 l'observatoire de Percival Lowell. C'est en 1894, sur un site choisi par E.C. Pickering (1846-1919), astronome à l'observatoire d'Arequipa, au Pérou, et frère du directeur du Harvard Observatory, que s'élèvent d'abord deux coupoles. Le site bénéficie d'un climat particulièrement favorable. Il est situé au sommet d'une colline couverte de pins sur les hauts plateaux de l'Arizona, où le *seeing* ²⁵ est excel-

21. LANKFORD, J. & SLAVINGS, R. L., 1997, pp. 90-91.

22. Il obtient son M. A. en 1903 et son PhD en 1909 à l'université d'Indiana. HOYT, W. H., p. 414 et document de l'Université d'Indiana à Bloomington (Lowell Archives).

23. LOWELL PUTNAM, W., 1994, p. 12, 22, 172.

24. BERENDZEN, R. *et al.*, 1984, p. 105.

25. Terme désignant une échelle qui précise les conditions d'observation.

lent. L'une des coupoles contient bientôt une lunette de 24 pouces (environ 60 cm). Slipher est chargé de la mettre au point et de l'équiper d'un spectrographe, qui sont tous deux en état de marche à la fin de 1902.

Les premières publications personnelles de Slipher datent de 1903 mais, jusqu'en 1913, ses travaux concernent les planètes, les étoiles, la comète de Halley (en 1911) et l'absorption interstellaire. Il commence en 1910 à s'intéresser à la nébuleuse d'Andromède. En participant avec Lowell et son frère E. C. Slipher (1906-1964) à l'étude de la rotation des planètes, il s'aperçoit très vite que le matériel dont il dispose devrait lui permettre de mesurer les déplacements des nébuleuses. Le 3 décembre 1910, il écrit à Lowell pour lui faire part des résultats de son étude spectrographique d'Uranus ²⁶. Il l'informe qu'il a obtenu un spectrogramme de la Grande nébuleuse d'Andromède qui lui semble montrer des aspects que personne n'a jusque-là remarqués. Il n'entre pas dans les objectifs de Percival Lowell de concurrencer, sur les spectres stellaires, les observatoires de Harvard (même si Slipher s'y est essayé), ni ceux de Lick ou du Mont Wilson ²⁷ ; son objet d'étude est le système solaire.

Ainsi la décision de Slipher de s'intéresser aux nébuleuses n'est-elle pas liée à des considérations de concurrence avec ces observatoires, comme le suggère Hetherington ²⁸, mais plutôt à une continuité dans les préoccupations de son propre observatoire et de son directeur. En revanche, c'est Slipher lui-même qui décide de se consacrer à cette recherche. Il le fait avec l'accord de Lowell, à condition que les travaux sur les planètes n'en souffrent pas. Smith affirme que le travail sur les nébuleuses n'est pas une idée de Slipher ²⁹. La correspondance conservée nous permet d'éclairer la question. Il est vrai que Lowell demande à Slipher de tester une nouvelle pellicule sensible au rouge sur les nébuleuses spirales, et que Slipher réalise ce spectre ³⁰. Mais Lowell n'aborde plus, ensuite, le sujet des nébuleuses avec Slipher, qui pourtant le tient au courant très régulièrement de ses travaux sur cette question. Il ne félicite Slipher qu'en 1914 ³¹, lorsqu'il a obtenu pour ces travaux la reconnaissance de ses collègues, car cela accroît la renommée de l'observatoire de Lowell.

26. Lettre de Slipher du 3 décembre 1910. Lowell Archives.

27. LOWELL PUTNAM, W., 1994.

28. HETHERINGTON, N. S., 1971, p. 312.

29. SMITH, R. W., 1982.

30. Lettre de Percival Lowell du 29 janvier 1909. Lowell Archives.

31. Lettre de Percival Lowell du 24 mai 1914. Lowell Archives.

Considérations matérielles

Dans sa lettre à Lowell déjà citée, Vesto Slipher indique qu'avec le matériel de l'observatoire et en particulier un appareil photographique de courte focale, il peut « obtenir le spectre de n'importe quel objet situé de façon favorable, assez brillant pour être observé sur la fente pour le guidage ». Il obtient d'abord un spectre de la nébuleuse d'Andromède, en 1909, mais ce n'est qu'en 1912 qu'il peut réaliser la première mesure de vitesses radiales d'une spirale (vitesse dans la ligne de vision : V_r) par effet Doppler³².

En effet, les difficultés sont nombreuses. Bien qu'il choisisse la plus grande des nébuleuses spirales, la faiblesse de son éclat et son caractère diffus compliquent l'étude spectrale. Pour obtenir une bonne résolution spectrale, il faut autant que possible disperser le spectre, c'est-à-dire bien séparer les raies les unes des autres. Malheureusement, cette dispersion rend plus pâle chacune des raies : c'est un compromis que recherche Slipher. Il dispose d'une lunette de 61 cm pour une focale de 98 cm. Vers 1910, le plus grand télescope du moment, le Crossley, installé au mont Hamilton (observatoire Lick), a un diamètre de 93 cm³³. Selon Slipher, pour la spectroscopie des nébuleuses, il ne présente pas d'avantage par rapport à la lunette de l'observatoire Lowell, car le problème est moins lié à une différence d'ouverture qu'à la taille de la fente, aux caractères du prisme et surtout à la rapidité de l'appareil photo³⁴. Cela n'est d'ailleurs pas contesté par le directeur de Lick, W. W. Campbell³⁵. Au Mont Wilson, le télescope de 1,5 m est en service depuis 1907³⁶, mais ce n'est qu'à partir de 1915 que Francis Pease (1881-1938) publie ses mesures de V_r ³⁷. Ses résultats, nous le verrons, sont du même ordre que ceux de Slipher et des autres astronomes. Slipher n'est donc pas, du point de vue de son équipement, en situation défavorable par rapport aux autres observatoires.

Il dispose d'un appareil photographique à courte focale³⁸, instrument bien adapté à la spectrographie, mais il lui manque une fente suffisamment

32. La vitesse est comptée négativement lorsque la nébuleuse se rapproche du système solaire et positivement dans le cas contraire, conformément à la relation Doppler-Fizeau écrite sous la forme $v = c(L-L_0)/L_0$, où L_0 est la longueur d'onde témoin et L celle qui est décalée.

33. KEELER, J. E., 1908b.

34. SLIPHER, V. M., 1915, p. 22.

35. Correspondance entre V. M. Slipher et W. W. Campbell de 1903 à 1935. Trois classeurs. Lowell Archives.

36. RITCHEY, G. W., 1910a et b.

37. PEASE, F. G., 1915a, b, c.

38. SLIPHER, V. M., 1913.

large pour laisser passer assez de lumière et un prisme plus dispersif. Ce matériel arrive à Flagstaff au cours de l'été 1912. Les spectres de comparaison sont ceux du fer et du vanadium. La plaque photographique est une Seed 30, une des plus rapides de l'époque. La rapidité des films est en effet un élément déterminant, bien souligné par Slipher, en raison du faible éclat des nébuleuses. Les spectres sont analysés avec un stéréocomparateur de Hartmann sous un grossissement de quinze fois.

2. Les mesures des vitesses radiales des nébuleuses spirales

Le 17 septembre 1912, la première V_r est obtenue après une pause de 6 heures 50 minutes. Slipher réalise trois autres mesures jusque dans la nuit du 31 décembre. Il doit arrêter là ce travail, car le télescope est alors utilisé pour d'autres observations. Il estime cependant que la faible dispersion de ses quatre évaluations atteste de leur validité.

Les résultats sont étonnants : la nébuleuse d'Andromède se rapproche du système solaire à la vitesse moyenne de 300 km/s. Aucune autre hypothèse qu'un déplacement ne peut expliquer, selon Slipher, le décalage spectral observé³⁹. Dès lors, il consacre une grande partie de son temps à ce type d'étude, afin de vérifier si toutes les nébuleuses spirales ont des déplacements aussi rapides.

Vitesses et sens de déplacement

Il vérifie si, parmi les nébuleuses, seules les spirales sont animées d'une vitesse aussi grande. En effet, par comparaison, les V_r des étoiles sont environ vingt-cinq fois plus faibles que celle observée par Slipher pour la nébuleuse d'Andromède⁴⁰. Son programme de travail consiste donc à mesurer les V_r d'autres spirales, mais aussi de nébuleuses supposées gazeuses et d'amas d'étoiles, appelés amas globulaires. Pour cela, Slipher utilise les mêmes instruments, car il estime qu'ils conviennent particulièrement bien à ce travail. En deux ans, ce sont environ quarante nébuleuses et amas stellaires qui sont étudiés⁴¹. Parmi ces objets, quinze sont des nébuleuses spirales.

Vesto Slipher présente les résultats de ses travaux au congrès de 1914 de l'*American Astronomical Society*, qui se tient à Evanston, dans une com-

39. L'information paraît dans le *Los Angeles Times* du 27 octobre 1913 (« Myriad... », 1913).

40. Voir par exemple W. W. CAMPBELL, 1910.

41. SLIPHER, V. M., 1915.

munication très appréciée ⁴². Avec ces nouvelles mesures, plusieurs constatations s'imposent à Slipher. Tout d'abord, seules deux nébuleuses se rapprochent du Soleil (vitesse négative) ; toutes les autres s'en éloignent, sont en récession (vitesse positive). Ensuite, les vitesses sont toutes élevées, allant de 200 à 1 100 km/s. Slipher note en outre que les deux nébuleuses qui se rapprochent du système solaire sont situées au sud de la Voie lactée.

Ejnar Hertzsprung (1873-1967), dans une lettre du 14 mars 1914, le félicite et déclare :

« Il me semble qu'avec cette découverte, la grande question de savoir si les spirales appartiennent au système de la voie lactée ou non est enfin résolue avec une grande certitude : elles n'en font pas partie ». ⁴³

Il suggère la mesure de Vr d'autres nébuleuses situées dans différentes parties du ciel et propose de comparer leurs Vr avec celles des amas globulaires, puisque Edward A. Fath (1880-1959), à Lick, a, dit-il, montré qu'il existait un décalage spectral pour ces objets sans l'attribuer à une Vr. Par ailleurs, Hertzsprung se demande si ce sont les nébuleuses ou la Voie lactée qui se déplacent.

Fait important, Hubble est présent à cette réunion ⁴⁴ : il a donc appris dès 1914 que les nébuleuses spirales possédaient des Vr élevées — alors même qu'il n'achève sa thèse qu'en 1917. Dès cette époque, Slipher est parfaitement intégré à la communauté scientifique, grâce à ces travaux. Sa correspondance avec les astronomes de son temps (Campbell, Curtis, Fath, Pease, Russel et Wright) en témoigne et son succès est couronné par la *standing ovation* qui suit sa conférence sur les nébuleuses en 1914, au Congrès d'Evanston.

La reproduction des mesures

Dès que les travaux de Slipher sont publiés, plusieurs astronomes s'attachent à reproduire ses mesures. En Europe, Max Wolf (1863-1932), alors directeur de l'observatoire Königstuhl de Heidelberg, fait autorité sur le sujet. Il a en effet publié seize listes de nébuleuses, avec plus de 6 000 objets, dont la plupart n'étaient pas référencés dans le NGC (*New General Catalog de Dreyer, qui avait remplacé le General Catalog des Herschel*). Aux États-Unis, les deux grands observatoires, celui de Lick au Mont

42. C'est la version imprimée de la présentation orale à Evanston qui fait l'objet de la publication de 1915.

43. Lettre de Hertzsprung du 11 mars 1914. Lowell Archives.

44. SHAROV, A. S. & NOVIKOV, I. D., 1993, p. 49.

Hamilton et celui du Mont Wilson, répètent les mesures. Ces observatoires privés sont financés respectivement par James Lick (1796-1876) et par Andrew Carnegie (1835-1919), deux riches *self-made men*. Ils ont tous deux été construits à l'instigation de James Ellery Hale (1868-1938), un astronome très entreprenant, fondateur de l'astrophysique ⁴⁵.

Ainsi, Wolf à Heidelberg ⁴⁶ et William Hammond Wright (1871-1959) à l'observatoire Lick ⁴⁷ produisent des mesures très voisines de celles de Slipher pour la nébuleuse d'Andromède ⁴⁸. Francis Pease, au Mont Wilson ⁴⁹, mesure NGC 4594 et trouve une valeur de + 1 180 km/s, proche des + 1 100 trouvés par Slipher. Joseph Haines Moore (1878-1949), à Lick, étudie la nébuleuse Messier 77 ⁵⁰ (NGC 1068). Les mesures sont ici discordantes : 1 100 km/s pour Slipher, 765 pour Pease ⁵¹ et 910 pour Moore ⁵², mais nous pouvons remarquer que cette spirale possède un éclat plus faible que la Grande nébuleuse d'Andromède et que, malgré cela, les ordres de grandeur sont conservés.

La grande différence entre les travaux de Slipher et ceux de ses collègues réside dans le caractère systématique des investigations du premier, alors que les mesures de chacun des autres observatoires sont peu nombreuses et ne participent pas d'un projet spécifique.

Ainsi, un petit groupe d'astronomes intéressés par l'étude des nébuleuses spirales reconnaît que les mesures de Slipher sont de grande valeur. La lettre de Campbell à Slipher ⁵³ a été considérée par Smith comme marquant une réticence de Campbell ⁵⁴. La réalité est tout autre. En effet, Slipher, comme il le faisait pour la plupart de ses travaux, a envoyé à Campbell, avant publication, le résultat de sa mesure en ne lui donnant que la valeur moyenne. Et Campbell de répondre : « J'espère que vous avez plus d'un seul résultat pour la vitesse, et je ne doute pas que vous les avez ». Ce

45. Voir sa biographie par H. WRIGHT, 1994.

46. Lettre de Wolf du 13 juin 1910. Lowell Archives.

47. Lettre de Wright du 14 août 1914. Lowell Archives.

48. Travaux rapportés par V. M. SLIPHER, 1917a.

49. PEASE, F. G., 1917.

50. Charles Messier a publié au XVIII^e siècle un catalogue d'objets nébuleux encore utilisé de nos jours.

51. PEASE, F. G., 1915c.

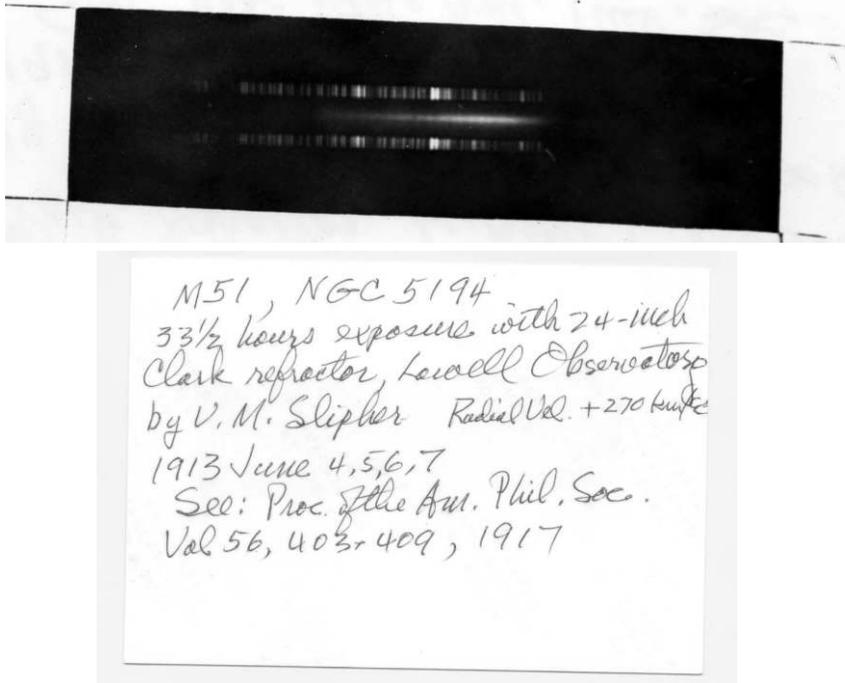
52. Cité par V. M. SLIPHER, 1917a. Lettre de Campbell du 9 avril 1913. Lowell Archives.

53. Lettre de Campbell du 9 avril 1913. Lowell Archives.

54. SMITH, R. W., 1982, p. 19.

à quoi Slipher rétorque immédiatement : « J'ai mesuré quatre plaques pour la vitesse radiale de la nébuleuse d'Andromède — leur étendue va de 284 à 308 km »⁵⁵. Le 30 mars 1914, Campbell le félicite chaleureusement pour ses résultats⁵⁶.

Figure 1. *Plaque photographique et commentaire correspondant de Vesto Slipher*



Source : Clichés de l'Observatoire Lowell à Flagstaff (Arizona).

Une critique méthodologique de John Reynolds

La seule critique publiée des mesures de Slipher vient de John Henry Reynolds (1874-1949), un spécialiste des Vr des étoiles, mais aussi un opposant déterminé à l'hypothèse des univers-îles⁵⁷. Riche industriel anglais, autodidacte en astronomie, il possédait son propre observatoire près de Birmingham⁵⁸. Il avait aussi doté un observatoire égyptien situé à

55. Brouillon manuscrit non daté de Slipher à Campbell. Lowell Archives.

56. Correspondance Campbell-Slipher, 30 mars 1914. Lowell Archives.

57. REYNOLDS, J. H., 1917.

58. « John Henry Reynolds », 1950.

Halwân d'un télescope de 30 pouces d'ouvertures (76 cm). Il allait souvent y observer des nébuleuses ; sa renommée devint telle que les astronomes du Mont Wilson lui communiquaient leurs plaques photographiques pour avoir son avis. Il publia 27 articles sur les nébuleuses de 1912 à 1938 dans les *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, mais n'effectua aucune mesure de vitesse radiale. Il fut trésorier, puis président de cette prestigieuse société. C'est pourquoi son article critique a été considéré avec attention par Slipher.

Dans une lettre à l'éditeur, il s'en prend directement au travail de Vesto Slipher, comme à celui du Mont Wilson. Il doute de la possibilité d'obtenir, pour les nébuleuses, des mesures fiables, et considère dans tous les cas qu'elles « n'ont pas le même poids que celles des étoiles, beaucoup plus brillantes ». Selon lui, le spectrographe utilisé par Slipher ne serait pas assez dispersif par rapport à celui du Mont Wilson, qui déroule un spectre sur une échelle linéaire de 4,3 mm pour des longueurs d'onde situées entre 3 930 et 4 950 angströms⁵⁹. Même avec ce dernier instrument, Reynolds ajoute qu'un déplacement de 0,1 mm correspond à une vitesse de 90 km/s. Comme il faut selon lui 80 heures de pause pour obtenir le spectre, les changements de température et de pression atmosphérique qui ne manquent pas de se produire pendant une telle durée sont suffisants pour entraîner des variations de même amplitude. Par ailleurs, dans les observations du Mont Wilson, le spectre de référence n'est capté qu'une seule fois au cours d'une pause d'une seconde, ce qui suffit, dit-il, pour entraîner une erreur importante. Reynolds appuie ensuite sa critique sur les écarts entre les mesures de la V_r de la grande nébuleuse d'Andromède (– 300 km/s pour Slipher et – 450 pour Wolf), mais il reconnaît qu'elles sont proches pour NGC 4594. Il termine sa note en déclarant que, pour l'instant, on ne peut pas considérer les vitesses des nébuleuses comme définitivement acquises.

Slipher, lui, fait remarquer que la vitesse des nébuleuses, élevée en comparaison de celle des étoiles, entraîne des décalages spectraux plus grands⁶⁰. Ainsi, la plus faible résolution spectrale de son instrument est

59. Notons au passage que cette unité ne devint couramment employée que vers 1920.

60. SLIPHER, V. M., 1917b. Notons que Vesto Slipher a sélectionné un type de nébuleuses, les spirales. À cette époque, la question des univers-îles ne se posait en effet que pour ce type d'objet, ce qui explique ce choix. On sait depuis Hubble qu'ils correspondent tous à des galaxies. C'est une raison qui fait que leurs V_r sont toutes élevées. Un second élément favorise une certaine homogénéité des résultats : le diamètre des télescopes employé ne permettait de mesurer les V_r que pour des spirales proches, dont la vitesse, comme le montra Hubble en 1929, reste relativement peu élevée.

selon lui compensée par un décalage plus important. Il précise en outre que son matériel est systématiquement testé sur des objets de vitesse connue. Enfin, contrairement à la pratique du Mont Wilson, les spectres de référence sont captés et superposés aux spectres de chaque nébuleuse tout au long de la longue exposition, et non pas seulement en fin d'exposition. L'écart entre les observateurs est, selon lui, le même que dans le cas des observations d'étoiles, soit environ 20 %. En effet, fait-il remarquer, la concordance des quatre observations des vitesses de la nébuleuse d'Andromède est aussi bonne que celle donnée par exemple pour l'étoile Canopus dans le catalogue des vitesses stellaires de Campbell, un spécialiste reconnu par tous. Et Vesto Slipher de conclure :

« Nous serions vraiment très heureux en science si l'imprécision de l'observation n'était pas supérieure à une petite fraction de la quantité observée ».

Il faut rappeler que les astronomes de position, dont Reynolds faisait partie, réalisaient des mesures beaucoup plus précises que les astrophysiciens et les critiquaient souvent pour cette imprécision ⁶¹.

Cette discussion pose plusieurs problèmes. Le savoir-faire de Slipher, sa méticulosité apparaissent dans ses courriers adressés à Lowell et dans les précautions qu'il prend avant de rendre publics ses résultats ⁶². La controverse qui s'est engagée avec Reynolds (en tout et pour tout à travers deux lettres à l'éditeur) a eu un effet positif sur Slipher, qui vérifie ses méthodes, tient compte des suggestions de Reynolds et multiplie les mesures. S'établit-il un consensus sur la validité des mesures de V_r , et donc sur la grande amplitude de ces vitesses ? En tout cas, Reynolds ne se manifeste plus sur ce sujet et Campbell les cautionne de son autorité. Il semble donc que la réponse soit positive, au moins après les publications de 1917 que nous allons analyser. Le consensus s'établit à partir de plusieurs arguments, scientifiques d'abord, avec la répétition concordante des mesures par Slipher ainsi que par d'autres astronomes, mais aussi un argument d'autorité, puisque la communauté des astronomes admet ces V_r élevées comme un fait qui n'est plus discuté. En 1925, Reynolds est membre de la commission des nébuleuses, dont Vesto Slipher est le président. Les documents conservés à l'observatoire Lowell ne font plus état de controverses sur ce sujet.

61. Sur les conflits entre astronomes traditionnels et astrophysiciens, voir J. LANKFORD & R. L. SLAVINGS, 1997, pp. 61-70.

62. SMITH, R. W., 1982.65. SLIPHER, V. M., 1917a.

La poursuite des travaux

En 1917, Slipher présente une nouvelle étude consacrée à la nébuleuse NGC 1068 (M 77), où il reprend tous les problèmes soulevés par Reynolds à propos de la précision des mesures et discute les discordances observées avec celles de Pease et de Moore ⁶³. Il est dorénavant en possession de six mesures, dont trois avec un spectrographe formé de deux prismes et muni d'une fente plus étroite. La dispersion du spectre est plus grande et les raies plus fines. Les mesures répondent ainsi à certains des critères de Reynolds. La moyenne des vitesses est de 1 120 km/s, avec des extrêmes de 1 060 et 1 145 km/s. Le problème que posent ces écarts ne lui paraît pas de nature à mettre en doute sa découverte fondamentale : les très grandes V_r de ces nébuleuses par rapport à celles des étoiles. Dans cette optique, Slipher rappelle encore la concordance des données pour les vitesses de la nébuleuse d'Andromède et plus récemment pour celles de NGC 4594. À leur tour, Campbell et Paddock (1919-1955) mesurent la vitesse d'une autre spirale, NGC 4151, en utilisant les clichés de Heber D. Curtis (1872-1942), réalisés à Lick : ils trouvent qu'elle s'éloigne à 940 km/s, avec une erreur estimée de 30 à 40 km/s ⁶⁴.

Le 13 avril 1917, Slipher est invité à donner une conférence sur les nébuleuses à l'*American Philosophical Society* ⁶⁵. Il rappelle à quel point il est difficile d'obtenir un spectre pour ces nébuleuses, en signalant que Pease, avec le grand télescope du Mont Wilson, a dû effectuer une pause de quatre-vingts heures pour obtenir le spectre de NGC 4594. Il ajoute que la question de la précision ne se résout pas par une plus grande ouverture. Il obtient en effet de bons spectres avec une lunette de 61 cm et des expositions de « seulement » 20 à 40 heures, réparties sur plusieurs nuits.

En 1921, Slipher mesure la V_r d'une nouvelle nébuleuse, très faible, NGC 584, située dans la constellation de la Baleine ⁶⁶. La découverte est signalée dans le Bulletin de l'observatoire de Harvard, sous la plume de Solon Bailey (1854-1931) :

« Le télégramme suivant a été reçu du Dr. V. M. Slipher, de l'Observatoire Lowell, Flagstaff, Arizona : les observations spectroscopiques de l'Observatoire Lowell montrent que la nébuleuse de Dreyer, numéro 584, dans la constellation de la Baleine possède la plus grande V_r connue, presque 2 000 km/s en récession ». ⁶⁷

63. SLIPHER, V. M., 1917c.

64. CAMPBELL, W. W. & PADDOCK, G. F., 1918.

65. SLIPHER, V. M., 1917a.

66. SLIPHER, V. M., 1921.

La vitesse, une fois confirmée, est effectivement très grande : 1 770 km/s. Mais le plus surprenant est une curieuse interprétation rapportée par Slipher. Compte tenu des hypothèses de l'époque sur l'âge de la Terre, évalué par les géologues, et « si on suppose que la présente nébuleuse en mouvement a quitté la région du Soleil aux commencements de la Terre », elle doit être éloignée de plusieurs millions d'années lumière. La chose apparaît à l'époque suffisamment sensationnelle pour être rapportée dans le *Chicago Daily Tribune* du 18 janvier 1921⁶⁸ et dans le *New York Times* du 19 janvier 1921⁶⁹. D'ailleurs, Gustav Strömberg (1882-1962), qui évalue la vitesse du Soleil par rapport aux nébuleuses spirales et aux amas globulaires, propose en 1925 d'exclure cette mesure de son évaluation, pensant qu'elle pourrait être erronée ou correspondre à un objet particulier⁷⁰.

Une dernière publication de Slipher, en 1922, vient ajouter de nouvelles mesures portant sur des nébuleuses spirales moins brillantes (dont NGC 584). Elles confirment toutes les données antérieures, c'est-à-dire que les V_r des spirales sont élevées⁷¹. Mais, alors que Slipher pensait auparavant qu'en multipliant les observations, il trouverait un nombre plus grand de nébuleuses avec des vitesses négatives (s'approchant de la Terre), ses nouvelles mesures démentent cette hypothèse. Slipher ne fait aucun commentaire à ce sujet. Il remarque toutefois que les nébuleuses à vitesses négatives sont toutes groupées dans une petite région du ciel (Andromède-Triangle). De même, il ne remarque pas une éventuelle relation entre la magnitude des spirales et leur V_r .

En réalité, après cette date, Vesto Slipher abandonne ses études sur les nébuleuses pour se consacrer à d'autres travaux et à la direction de l'observatoire. Il est vrai qu'il a probablement atteint les limites de sa lunette de 24 pouces et qu'il ne peut étudier les nébuleuses moins lumineuses. C'est l'observatoire du Mont Wilson, avec son télescope de 2,5 m, qui prend le relais.

67. BAILEY, S. I., 1921. La valeur retenue actuellement est de 1 802 km/s (NASA Extragalactic Database : <http://nedwww.ipac.caltech.edu/>).

68. « The sky hooter », 1921.

69. « Dreyer... », 1921.

70. STRÖMBERG, G., 1925.

71. SLIPHER, V. M., 1922.

L'acceptation des mesures de Slipher par la communauté des astrophysiciens

La communauté des astrophysiciens en est alors à sa troisième génération. Elle se sépare des astronomes « classiques » sous l'impulsion de E. Hale ⁷².

Des conflits ont existé entre Percival Lowell et les directeurs des observatoires Yerkes (Chicago University) et Lick, à partir de 1888. Ils portent sur les qualités respectives des sites des observatoires et de leurs instruments ⁷³. Le débat est porté dans la grande presse, ce qui agace les astronomes autant que Campbell. À la demande de Lowell, Slipher a dû s'impliquer dans cette querelle en 1908, mais une lettre de Campbell à Slipher montre qu'il ne lui en tient pas rigueur ⁷⁴. La qualité de ses travaux est reconnue. En témoigne aussi leur utilisation ultérieure, notamment par Curtis en 1920 lors du « Grand Débat » ⁷⁵, ainsi que par Lundmark ⁷⁶ et Eddington ⁷⁷.

Il convient cependant de séparer l'acceptation du fait que les nébuleuses spirales aient une grande V_r , le plus souvent en récession, des théories que Slipher en déduit. Les mesures sont acceptées, car reproduites par d'autres et cohérentes d'une nébuleuse à l'autre. En revanche, en 1914-1920, la conception des univers-îles est loin de faire l'unanimité. Il n'y a pas de discours officiel sur l'univers. C'est cependant ce que certains voudraient obtenir en organisant en 1920 à Washington un « Grand Débat » entre Shapley (1885-1972) et Curtis, débat qui ne permet pas d'obtenir un consensus ⁷⁸. Les travaux de Slipher sont alors utilisés par Curtis à l'appui de son argumentation, mais Shapley n'en fait pas état. Ainsi, tous les astronomes n'acceptent pas les hypothèses inférées par Vesto Slipher à partir de ses mesures. Cependant, des théoriciens prennent en compte ses travaux à l'appui de leurs hypothèses.

En 1925, Slipher est nommé président de la commission des nébuleuses de l'Union astronomique internationale : nouveau signe de reconnaissance de la communauté des astronomes et pas seulement américaine.

72. Voir pour une étude très précise J. LANKFORD & R. L. SLAVINGS, 1997 ainsi que L. PYENSON & S. SHEETS-PYENSON, 1999, pp. 118-124.

73. Ce conflit est relaté avec précision par J. LANKFORD & R. L. SLAVINGS, 1997, pp. 200-206.

74. W. W. Campbell à V. M. Slipher, 22 novembre 1909. Lowell Archives.

75. « National Research... », 2003.

76. LUNDMARK, K., 1924.

77. EDDINGTON, A. S., 1917.

78. SMITH, R. W., 1982. La transcription complète des présentations de Shapley et Curtis peut être consultée dans « National Research... », 2003.

3. Les hypothèses sur l'univers

Quelles conséquences pour les observations de Slipher ?

Dans son premier article de 1913, Slipher croit tenir une explication pour la *nova* observée en 1885 dans la nébuleuse d'Andromède⁷⁹. Il estime que le « voyage » à grande vitesse de la nébuleuse, objet de grandes dimensions, lui a fait rencontrer sur son chemin une étoile noire⁸⁰ et ce contact aurait « allumé » l'étoile jusqu'ici non visible. L'hypothèse montre que pour Slipher, en 1913, les nébuleuses spirales ne sont pas des objets composés d'étoiles ; d'ailleurs, les télescopes ne permettent pas, alors, de les résoudre en étoiles.

D'autre part, Vesto Slipher observe que les nébuleuses qui ont des vitesses négatives sont situées dans le sud de la Voie lactée. Il pense qu'en multipliant les observations, il trouvera un plus grand nombre de nébuleuses ayant une vitesse négative dans cette partie sud de l'hémisphère. Son hypothèse est qu'il existe une sorte de dérive des nébuleuses spirales à travers la galaxie (*drift hypothesis*: « *the spirals might be drifting across the Milky Way* »). L'augmentation du nombre d'observations disponibles en 1922 infirme cette première hypothèse.

Enfin, Slipher constate que les trois spirales les plus rapides sont vues par la tranche ; c'est, selon lui, qu'elles se déplacent dans ce plan : le vecteur vitesse est donc dirigé principalement dans l'axe de vision. Au contraire, lorsque les nébuleuses spirales sont plus inclinées, nous ne mesurons qu'une composante de cette vitesse, qui est ainsi plus faible. Cette impression ne fut pas non plus confirmée par la répétition des observations ; K. Lundmark (1889-1958) démontra en 1925 qu'une telle relation n'existe pas⁸¹.

En 1917, Slipher se pose une question fondamentale : quelle est la part du mouvement du système solaire dans ce déplacement ? En effet, ce qui est en jeu est bien une vitesse relative entre plusieurs objets qui sont tous, estime-t-il, en mouvement : le Soleil par rapport aux étoiles de la Voie lactée, la Voie Lactée et les nébuleuses. Il connaît les travaux de C. D. Perrine (1867-1951), qui ont montré que le système solaire se déplace par rapport à des étoiles de référence situées de part et d'autre du Soleil dans une direc-

79. SLIPHER, V. M., 1913.

80. Les étoiles noires seraient des étoiles de la taille du Soleil, mais obscures (CLERKE, A. M., 1903).

81. LUNDMARK, K., 1925.

tion appelée l'apex, à la vitesse de 19,5 km/s ⁸². Qu'en est-il de la contribution de ce déplacement par rapport aux nébuleuses, sachant que parmi ces dernières, certaines ont une vitesse négative et d'autres, plus nombreuses, une vitesse positive ? Avec ces objets comme référence, le déplacement du Soleil se fait dans une direction différente, à la vitesse de 700 km/s. En comparant les mouvements du système solaire relativement aux étoiles d'une part, relativement aux nébuleuses d'autre part, Slipher en déduit que le système solaire se déplace de conserve avec les étoiles et forme donc avec ces dernières un ensemble lié.

Ainsi toutes les étoiles se trouvent-elles considérées comme associées dans un même objet, la galaxie. Vesto Slipher écrit ⁸³ : « les nébuleuses spirales sont des systèmes stellaires vus à grande distance » et « la Voie Lactée [est] une grande nébuleuse spirale que nous voyons de l'intérieur ». Par ailleurs, il constate que, pour les spirales considérées comme un ensemble, la vitesse de récession est en moyenne positive. Cela l'amène à suggérer que les nébuleuses spirales pourraient s'éloigner les unes des autres, mais il fait remarquer aussitôt que l'observation d'amas de spirales contredit cette hypothèse ⁸⁴.

Un astronome européen travaille aussi sur ce sujet : le Strasbourgeois Carl Wilhelm Wirtz (1876-1939). Mais, en raison de la Première Guerre mondiale, ses travaux sont indépendants de ceux réalisés aux États-Unis. Il ne dispose de ce fait que de très peu de V_r : celles mesurées par des astronomes européens, ainsi que les toutes premières mesures de Slipher, réalisées au début du conflit. Ses conclusions sont pourtant très voisines ⁸⁵. Cette importante question est également abordée par deux astronomes canadiens, R. K. Young (1866-1977) et W. E. Harper (1878-1940), en 1916 ⁸⁶. Dans l'introduction de leur article, ils considèrent que si l'hypothèse des « univers-îles » était avérée, alors notre galaxie, prise comme une nébuleuse spirale parmi d'autres, se déplacerait dans l'espace à des vitesses du même ordre que ses compagnes. La vitesse et l'apex par rapport aux nébuleuses

82. PERRINE, C. D., 1916.

83. SLIPHER, V. M., 1917, p. 409.

84. En réalité, il ne mesure que les vitesses d'objets proches, car ce sont les seuls dont la dimension et l'éclat sont suffisants pour les mesures de V_r . Ainsi, certaines de ces galaxies sont en interaction gravitationnelle avec la nôtre. Avec l'amélioration des techniques, des galaxies plus lointaines furent ensuite mesurées, avec des vitesses plus grandes. En 1917, Slipher n'a pas encore mesuré beaucoup de grandes V_r .

85. WIRTZ, C., 1922.

86. YOUNG, R. K. & HARPER, W. E., 1916.

qu'ils proposent ne sont pas très différents de ceux de Slipher. Truman publie des résultats identiques ⁸⁷.

Pour sa part, Paddock, toujours en 1916, utilise les 15 mesures de Vr de Slipher, auxquelles il ajoute celles de Wilson sur les Nuages de Magellan ⁸⁸ (galaxies proches de la Voie lactée) ⁸⁹. Il fait remarquer que les spirales peuvent être en récession les unes par rapport aux autres. En conséquence, il faut introduire (comme l'a fait Perrine avec les étoiles) un paramètre K qui prend en compte « une composante en expansion ou systématique, qu'il s'agisse d'une expansion réelle ou d'un terme inclus dans le déplacement spectroscopique des raies qui ne serait pas dû aux vitesses ». Ce terme, dont la signification physique n'est pas connue, et qui est également proposé par Wirtz ⁹⁰, fut ensuite utilisé par les cosmologistes et par Hubble pour mesurer le taux d'expansion. Alors que les astronomes interprètent le décalage observé comme une vitesse d'objets en mouvements relatifs, Paddock introduit donc deux explications supplémentaires : une expansion, mais aussi un possible phénomène inconnu, source d'un décalage des raies spectrales.

Reprenant une généralisation de l'hypothèse nébulaire de Laplace, qui ferait des nébuleuses spirales des systèmes solaires en formation, Slipher considère que si notre système solaire a évolué à partir d'une nébuleuse, les nébuleuses dont il est question ne sont probablement pas les nébuleuses spirales : notre système stellaire est probablement né d'une autre sorte de nébuleuse ⁹¹. Les nébuleuses spirales ne sont pas, pour Slipher, des systèmes solaires en formation. Il est le premier à faire cette remarque de façon aussi précise.

Les travaux de Slipher et les théories de l'expansion

Cet épisode de l'histoire de l'astronomie occupe une place centrale dans la question de l'expansion de l'Univers. Il n'est pourtant pas dans notre propos de retracer l'histoire des théories cosmologiques d'Einstein (1879-1955) à Friedmann (1888-1925) et Lemaître ⁹². Nous limiterons notre discussion au rôle qu'ont pu jouer les travaux de Slipher vis-à-vis des hypothèses des théo-

87. TRUMAN, O. H., 1916.

88. WILSON, R. E., 1915.

89. PADDOCK, G. F., 1916.

90. WIRTZ, C., 1924.

91. SLIPHER, V. M., 1917, p. 409.

92. Pour une histoire détaillée de cette question, voir J.-P. LUMINET, 1997.

riciens dans la période qui précède les publications de Hubble sur les distances des spirales (janvier 1925) et la relation vitesse-distance (1929).

Willem De Sitter (1872-1934) est un astronome hollandais. De 1899 à 1916, il a publié de nombreux articles d'astronomie « classique ». À partir de 1916, il s'intéresse à la théorie de la relativité, mais il reprend dès 1917 ses occupations astronomiques et administratives comme directeur de l'observatoire de Leyde. Il participe de nouveau au débat cosmologique après les publications de Hubble en 1929⁹³.

En 1915, dans le cadre de la Relativité générale, Einstein s'est aperçu que l'Univers devait être en expansion⁹⁴. En 1916 et 1917, De Sitter publie une série de trois articles sur les conséquences astronomiques de la relativité générale. Le troisième concerne la cosmologie⁹⁵. Il compare trois « systèmes » d'univers : un univers euclidien (C), sphérique et fini, celui d'Einstein (A) et le sien, hyperbolique et fini (B). Les résultats de Slipher sont déterminants pour tester ces modèles. Il les obtient d'Arthur Eddington, qui les a publiés dans le compte rendu de la 97^e réunion de la *Royal Astronomical Society*⁹⁶. Les mesures de Vesto Slipher sont prises en compte avec celles de Pease, Moore, Wright et Wolf, qui, rappelons-le, ont été suscitées par les premiers travaux de Slipher. C'est donc dès 1917 (et non pas en 1920, comme le propose Hetherington⁹⁷) que De Sitter a connu les travaux de Slipher. Il utilise huit mesures sur trois objets et, même s'il estime le nombre de mesures encore insuffisant, il considère qu'elles sont un argument en faveur d'un modèle d'univers qui admet l'expansion (système B). Il prédit en outre que les ondes lumineuses doivent être étirées, produisant un décalage vers le rouge, d'autant plus important que les objets sont plus distants⁹⁸. Quant à l'interprétation à donner à ce décalage, il l'attribue à une expansion de l'Univers plutôt qu'à un mouvement de récession des nébuleuses spirales.

93. BLAAUW, A., 1975.

94. Pour des raisons philosophiques, il a ajouté à son modèle mathématique une constante dite cosmologique Λ qui rendait l'univers statique. Cependant, cette adjonction n'est pas complètement *ad hoc*, car les équations avec constante cosmologique sont plus générales, puisque Λ peut prendre différentes valeurs.

95. DE SITTER, W., 1917.

96. EDDINGTON, A. S., 1917.

97. HETHERINGTON, N. S., 1971.

98. Pour lui, il existe une relation vitesse-distance, qui est quadratique (c'est aussi ce que suggère la courbe donnée par Lundmark et discutée plus loin). En 1923, un physicien, Hermann Weyl (1885-1955), montre que la relation est linéaire (WEYL, H., 1923 et 1952) et en 1925, Lemaître le confirme (LEMAÎTRE, G., 1925.). C'est cette idée que Hubble met en œuvre dans ses travaux.

Les vérifications des prédictions de De Sitter par les astronomes

En 1924, un certain nombre d'astronomes, comme De Sitter, Strömberg et surtout Ludwik Silberstein (1872-1948), ne font pas de distinction entre les amas globulaires et les nébuleuses spirales ; au contraire, Lundmark et Slipher les distinguent et considèrent que les premiers appartiendraient à la galaxie. Ce fait n'a pas été souligné par les études historiques antérieures. Il est cependant capital, car les amas globulaires sont proches et en rotation autour du centre galactique, au contraire des nébuleuses spirales. Cette confusion a un impact important sur les évaluations du rayon de courbure de l'univers et de la relation vitesse-distance.

Silberstein propose en 1924 une méthode qui permet de calculer la courbure de l'espace-temps telle qu'elle est proposée par De Sitter⁹⁹. Il tente de la mesurer en utilisant les V_r des amas globulaires, ce que critique Lundmark, qui lui reproche une sélection discutable de sept mesures sur les seize disponibles et estime que « le faible effet de la courbure de l'espace-temps doit être surpassé par le mouvement propre des amas globulaires »¹⁰⁰. Lundmark reprend la méthode de Silberstein, mais en utilisant les dernières mesures effectuées par Vesto Slipher sur les nébuleuses spirales¹⁰¹. Il rejoint ainsi les hypothèses antérieures de Slipher quant à l'association du système solaire à un vaste ensemble stellaire, la galaxie, par rapport auquel dérivent les nébuleuses spirales. Il évalue la distance de ces dernières par deux méthodes : celle de la magnitude totale et celle du diamètre apparent. En supposant que ces deux grandeurs ne dépendent que de la distance, il calcule des distances relatives, rapportées à celle de la nébuleuse d'Andromède, prise comme unité. Il met alors en relation ces distances avec les V_r mesurées par Vesto Slipher. Les points sont assez dispersés, mais

99. SILBERSTEIN, L., 1924.

100. En novembre 1924, Silberstein répond à Lundmark (SILBERSTEIN, L., 1925). Il reconnaît que la nécessité d'étendre son étude à d'autres objets est « particulièrement bienvenue », mais il persiste à penser que les amas globulaires sont de meilleurs candidats pour la mesure de la courbure de l'espace-temps. Lui aussi, cependant, fait appel à Vesto Slipher pour ses mesures portant sur les amas globulaires. Dans ses nouveaux calculs, il mêle les amas globulaires, les deux Nuages de Magellan et une spirale (M 33).

101. Il reprend aussi l'idée de comparer l'apex du soleil selon que la référence est celle des spirales ou celle des étoiles proches. Le mouvement du Soleil diffère selon ces deux repères ; Lundmark en déduit que le Soleil est probablement en rotation autour du centre galactique, tandis que la Voie lactée est en mouvement relatif par rapport aux nébuleuses spirales (LUNDMARK, K., 1924). En 1925, Lundmark confirme la position de l'apex du Soleil par rapport aux spirales et montre qu'il existe probablement une « rotation de notre amas local dans le plan de la Voie lactée autour de la région du Sagittaire », considérée comme le centre de la Galaxie (LUNDMARK, K., 1925).

Lundmark conclut à une relation possible entre vitesse et distance, tout en précisant que cette relation « reste encore obscure »¹⁰².

En examinant ces différents travaux, il apparaît que les résultats de Slipher sont considérés comme d'une très grande importance pour les astronomes qui, sans être nécessairement d'accord entre eux, mettent en place la cosmologie observationnelle. Arthur Eddington lui demande ses 40 mesures de V_r encore non publiées pour son livre *Mathematical Theory of Relativity* ; ces observations confortent sa position en faveur du modèle de De Sitter, contre celui d'Einstein¹⁰³. C. Wirtz appuie de même les hypothèses de De Sitter avec 42 nébuleuses, dont celles communiquées à Eddington par Slipher : il établit une relation significative entre la V_r et le logarithme de la dimension angulaire des nébuleuses (possible indicateur de distance)¹⁰⁴. Gustav Strömberg enfin, qui travaille alors au Mont Wilson, a lui aussi obtenu de Vesto Slipher toutes ses mesures disponibles, mais il en tire d'autres conclusions : les coordonnées de l'apex solaire ne sont pas différentes selon qu'il prend les amas globulaires ou les nébuleuses non-galactiques comme référence, et il ne met pas en évidence de relation entre la distance de ces objets et leur V_r , ce qui, pour lui, contredit le modèle d'univers de De Sitter¹⁰⁵.

D'autres travaux affinent les conséquences cosmologiques de la relativité générale. Il faut citer en particulier ceux de Howard P. Robertson (1903-1961)¹⁰⁶, d'Alexandre Friedmann et de l'abbé Georges Lemaître¹⁰⁷. Lemaître a eu connaissance des travaux de Slipher dès 1925, lors de son séjour au Massachusetts Institute of Technology, où il avait accès à toutes les publications américaines. Il a rencontré Slipher, comme l'atteste une carte postale¹⁰⁸. Même s'il ne fait pas explicitement référence à ses mesures dans son article inaugural sur la théorie de l'expansion en 1927, Lemaître applique à son hypothèse des données numériques qui lui sont empruntées

102. LUNDMARK, K., 1924, p. 768. L'allure des points semble suggérer une relation quadratique.

103. EDDINGTON, A. S., 1931.

104. Il tente la même démarche avec l'éclat apparent de ces nébuleuses, mais la relation ne lui apparaît pas significative (WIRTZ, C., 1924).

105. STRÖMBERG, G., 1925.

106. ROBERTSON, H. P., 1928 et 1929. Il utilise les distances des nébuleuses spirales mesurées par Hubble et les V_r de Slipher (ROBERTSON, H. P., 1928, p. 845).

107. On pourra se reporter à un ouvrage récent consacré à Lemaître et la cosmologie : J. FARREL, 2005.

108. Carte postale de Lemaître du 21 juin 1925. Lowell Archives.

par l'intermédiaire de Strömberg¹⁰⁹. Ajoutons encore qu'Edwin Hubble a utilisé les Vr de Slipher dans sa première publication de la relation vitesses-distances, sans cependant le créditer¹¹⁰. Milton Humason (1891-1972), lui, poursuit les travaux de Slipher, en les étendant à des galaxies - comme on les appelle dès 1924 - de plus en plus lointaines.

Les travaux théoriques des cosmologistes n'étaient probablement pas connus de Vesto Slipher au moment où il travaillait sur les nébuleuses spirales. Il n'y fait jamais allusion, ni dans ses articles ni dans sa correspondance. Lorsqu'il parle de mouvements de déplacement des nébuleuses par rapport au système solaire, il le fait dans le cadre de la mécanique céleste classique. Sa correspondance conservée à l'observatoire Lowell montre que ses relations épistolaires avec les théoriciens sont tardives : 1921 avec Arthur Eddington, 1925 pour Lemaître, 1928 pour De Sitter. L'explication ne réside pas dans une interruption des communications du fait de la guerre, car les travaux publiés continuaient à s'échanger de part et d'autre de l'Atlantique (à l'exception pourtant de ceux des auteurs allemands et, dans une certaine mesure, de ceux des Français). Cette ignorance est plus probablement liée à des différences de culture et de préoccupations scientifiques qui mériteraient d'être étudiées.

*

L'analyse des travaux de Vesto Slipher sur les nébuleuses spirales montre le rôle fondamental qu'a joué la mesure des Vr dans la naissance de la cosmologie observationnelle. Certains acteurs et commentateurs de cette histoire ont sous-estimé la contribution de Slipher à ces découvertes. Une analyse complète des archives montre non seulement que Vesto Slipher apporte une information nouvelle, fondamentale et inattendue (les nébuleuses spirales ont des Vr très élevées), mais aussi qu'il introduit des hypothèses explicatives ensuite reprises par les travaux de ses successeurs : la plupart des nébuleuses spirales s'éloignent (celles qui se rapprochent de nous apparaissant comme l'exception) et notre galaxie est elle-même une

109. De même, Lemaître utilise l'article de Hubble sur les distances d'un grand nombre de nébuleuses, paru en 1926 (HUBBLE, E. P., 1926). Ces données d'observation semblent conforter son hypothèse cosmologique.

110. Il ne lui rend hommage que tardivement, en 1953, en déclarant lors de sa conférence George Darwin : « Vous devez vous souvenir que la première vitesse d'une nébuleuse spirale a été mesurée par Slipher en 1912 (- 300 km/s pour M 31). Je mentionne ce détail parce que le premier pas dans un nouveau domaine est le grand pas. Une fois qu'elle est ouverte, la voie est claire et tout peut suivre ». (HUBBLE, E. P., 1953).

nébuleuse spirale en déplacement.

Les mesures très délicates effectuées avec précision et ténacité par Slipher lui permettent de prendre une place éminente dans la communauté des astronomes, qui le nomment président de la commission des nébuleuses de l'Union astronomique internationale dès 1925. Cette place, il l'occupe malgré l'éloignement de son observatoire et malgré la personnalité forte et controversée de Percival Lowell, son propriétaire et directeur.

Plus encore, ses données sont utilisées par d'autres astronomes, ce qui leur permet de discuter les hypothèses des cosmologistes, en particulier celle de De Sitter. Vesto Slipher, lui, n'a pas eu connaissance de ces travaux théoriques : ses hypothèses ont été énoncées de façon indépendante.

Sources imprimées

- « Myriad suns fly at earth », *Los Angeles Times*, 1913, p. 14.
- « Dreyer nebula N0. 584 inconceivably distant », *New York Times*, 1921, p. 6.
- « The sky hooter », *Chicago Daily Tribune*, 1921, p. 6.
- BACKHOUSE, Thomas W., « Nebula in Andromeda and Nova, 1885 », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 48, 1888, p. 108.
- BAILEY, Solon I., « Bulletin 739 », *Harvard College Observatory Bulletin*, 1921.
- CAMPBELL, William W., « Some preliminary results deduced from observed radial velocities of stars », *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 4, 1910, p. 355.
- CAMPBELL, William W. & PADDOCK, G. F., « The Spectrum and Radial Velocity of the Spiral Nebula N. G. C. 4151 », *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 30, 1918, p. 68.
- CLERKE, Agnes Mary, *Problems in astrophysics*, Londres, Adam & Charles Black, 1903.
- DE SITTER, Willem, « On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences. Third paper », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 78, 1917, pp. 3-28.
- EDDINGTON, Arthur S., « The motion of spiral nebulae. Ninety-seventh Annual General Meeting », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 77, 1917, pp. 375-382.
- , « The recession of the extra-galactic nebulae », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 92, 1931, pp. 3-7.
- HERSCHEL, William, « Astronomical observations relating to the construction of the heavens, arranged for the purpose of a critical examination, the results of which appears to throw some new light upon the organization of the celestial bodies », *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 101, 1811, pp. 269-336.
- , « Astronomical observations relating to the sidereal part of the heavens, and its connection with the nebulous part, arranged for the purpose of a critical examination », *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 106, 1814, pp. 248-284.
- , « Astronomical observations and experiments, selected for the purpose of ascertain-

- ning the relative distances of clusters of stars, and of investigating how far the power of our telescopes may be expected to reach into space when directed to ambiguous celestial objects », *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 108, 1818, pp. 429-470.
- HUBBLE, Edwin P., « Extragalactic nebulae », *Astrophysical Journal*, 64, 1926, pp. 321-369.
- , « The law of red shifts (George Darwin Lecture) », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 113, 1953, p. 658.
- HUGGINS, William « Further observations on the spectra of some of the stars and nebulae, with attempts to determine therefore whether these bodies are moving toward or from Earth, also observations on the spectra of the sun and of comet II », *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 158, 1868, pp. 529-564.
- , « On the Proper Motions of the Nebulae », *Astronomical register*, 11, 1873, pp. 269-271.
- KANT, Emmanuel, *Histoire générale de la Nature et théorie du ciel*, Paris, Vrin, 1984 (édition originale 1755).
- KEELER, John E., « Photographs of nebulae and clusters made with the Crossley reflector », *Publications of Lick Observatory*, 8, 1908 (a), p. 1.
- , « The Crossley Reflector of the Lick Observatory », *Publications of Lick Observatory*, 8, 1908 (b), pp. 11-29.
- LAPLACE, Pierre Simon de, *Œuvres complètes de Laplace publiées sous les auspices de l'Académie des Sciences, par MM. les secrétaires perpétuels*, Paris, Gauthier-Villars, 1878.
- LEMAÎTRE, Georges, « Note on De Sitter's Universe », *Journal de mathématiques et de physique*, 4, 1925, pp. 37-41.
- , « Hypothèses cosmogoniques », *Ciel et Terre*, 41, 1945, pp. 1-11.
- , *L'hypothèse de l'atome primitif. Essai de cosmogonie*, Neuchâtel-Bruxelles, éditions du Griffon et Hermès, 1946.
- LUNDMARK, Knut, « The determination of the curvature of space-time in de Sitter's world », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 84, 1924, pp. 747-770.
- , « The motions and the distances of spiral nebulae », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 85, 1925, pp. 865-894.
- PADDOCK, George F., « The relation of the system of stars to the spiral nebulae », *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 38, 1916, pp. 109-115.
- PARSONS, Charles, *The Scientific Papers of William Parsons, third Earl of Rosse (1800-1867)*, Londres, The Country Press, 1926.
- PEASE, Francis G., « Radial Velocities of Six Nebulae », *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 27, 1915 (a), pp. 239-240.
- , « Radial Velocity of the Andromedæ Nebula », *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 27, 1915 (b), p. 134.
- , « The Radial Velocity of the Nebula N. G. C. 1068 », *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 27, 1915 (c), pp. 133-134.
- , « The rotation and radial velocity of the spiral nebula N. G. C. 4594 », *Popular Astronomy*, 25, 1917, pp. 26-27.
- PERRINE, Charles D., « Some determinations of the Apex and velocity of Solar motion from the radial velocities of the brighter stars, including an apparent relation to

- propor motion », *Astrophysical Journal*, 44, 1916, pp. 103-116.
- POINCARÉ, Henri, *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques professées à la Sorbonne*, Paris, Hermann & fils, 1911.
- REYNOLDS, John H., « Motion in the spiral nebulae M 101 and NGC 4594 », *The Observatory*, 40, 1917, pp. 131-132.
- RITCHEY, George W., « Notes on photographs of nebulae made with the 60-inch reflector of the Mount Wilson Observatory », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 70, 1910 (a), p. 623.
- , « On some methods and results in direct photography with the 60-inch reflecting telescope of the Mount Wilson Solar Observatory », *Astrophysical Journal*, 32, 1910 (b), pp. 26-35.
- ROBERTS, Isaac, « Photographs of the nebulae M 31, h 44, and h 51 Andromedæ, and M 27 Vulpeculæ », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 49, 1888, p. 65.
- ROBERTSON, Howard P., « On relativistic cosmology », *Philosophical Magazine*, 5, 1928, pp. 835-848.
- , « On the foundations of relativistic cosmology », *Proceedings of the National Academy of Science*, 15, 1929, pp. 822-829.
- SILBERSTEIN, Ludwik, « The curvature of de Sitter's space-time derived from globular clusters », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 84, 1924, pp. 363-366.
- , « The determination of the curvature radius of space-time. In reply to Dr. Knut Lundmark », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 85, 1925, pp. 285-290.
- SLIPHER, Vesto M., « The radial velocity of the Andromeda Nebula », *Lowell Observatory Bulletin*, 2, 1913, pp. 56-57.
- , « Spectrographic Observations of Nebulae », *Popular Astronomy*, 23, 1915, pp. 21-24.
- , « Nebulae », *Proceedings of the American Philosophical Society*, 56, 1917 (a), pp. 403-409.
- , « Radial velocity observations of spiral nebulae », *The Observatory*, 40, 1917 (b), pp. 304-306.
- , « The spectrum and velocity of the nebula N.G.C. 1068 (M 77) », *Lowell Observatory Bulletin*, 3, 1917 (c), pp. 59-63.
- , « Two nebulae with unparalleled velocities », *Popular Astronomy*, 29, 1921, p. 128.
- , « Further notes on spectrographic observations of nebulae and clusters », *Popular Astronomy*, 30, 1922, pp. 9-11.
- STRÖMBERG, Gustav, « Analysis of radial velocities of globular clusters and non-galactic nebulae », *Astrophysical Journal*, 61, 1925, pp. 353-362.
- TRUMAN, O. H., « The motions of the spiral nebulae », *Popular Astronomy*, 24, 1916, p. 111.
- TURNER, Herbert H., *Modern astronomy. Being some account of the revolution of the last quarter of a century*, Westminster, A. Constable & Co., 1901.
- WEYL, Herman, « Zur allgemeinen Relativitätstheorie », *Physical Zeitschrift*, 1923, 24, p. 230.
- , *Space, Time, Matter*, Londres, Courier Dover Publications, 1952.
- WILSON, Ralph E., « Note on the Radial Velocities of Six Nebulae in the Magellanic

- Clouds », *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 27, 1915, p. 86.
- WIRTZ, Carl, « Notiz zur Radialbewegung der Spiralnebel », *Astronomische Nachrichten*, 216, 1922, pp. 452-453.
- , « De Sitters Kosmologie und die Radialbewegungen der Spiralnebel », *Astronomische Nachrichten*, 222, 1924, pp. 5306-5308.
- YOUNG, Charles T., *A textbook for general astronomy for Colleges and scientific schools*, Boston, New York, Chicago, Londres, Ginn & Co., 1898.
- YOUNG, Reynolds K. & HARPER, William E., « The Solar Motion as Determined from the Radial Velocities of Spiral Nebulae », *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 10, 1916, p. 134.

Bibliographie

- « John Henry Reynolds », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 110, 1950, pp. 131-132.
- « National Research Council transcript of the Great Debate », *Bulletin of the National Research Council*, 2, 2003, pp. 171-217.
- BERENDZEN, Richard, HART, Richard & SEELEY, Daniel, *Man discovers the galaxies*, New York, Columbia University Press, 1984.
- BLAAUW, Adriaan, « Sitter, Willem de », *Dictionary of Scientific Biography*, New York, Charles Scribner's sons, 1975.
- CROWE, Michael J., *Modern theories of the universe from Herschel to Hubble*, New York, Dover Publications, 1994.
- FARRELL, John, *The day without yesterday. Lemaître, Einstein, and the birth of modern cosmology*, New York, Thunder's Mouth Press, 2005.
- FERNIE, Donald, « The historical quest for the nature of the spiral nebulae », *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 82, 1970, p. 1219.
- HALL, John S., « V. M. Slipher's Trailblazing Career », *Sky and Telescope*, 39, 1970, pp. 84-86.
- HAHN, Roger, *Le système du monde. Pierre Simon Laplace, un itinéraire dans la science*, Paris, Gallimard, 2004.
- HART, Richard & BERENDZEN, Richard, « Slipher, Vesto Melvin », *Dictionary of Scientific Biography*, New York, Charles Scribner's sons, 1975.
- HETHERINGTON, Norriss S., « The measurement of radial velocities of spiral nebulae », *ISIS*, 62, 1971, pp. 309-313.
- HOYT, William H., « Vesto Melvin Slipher November 11, 1875-November 8, 1969 », *Biographical memoirs of the National Academy of Sciences*, 52, 1980, pp. 411-449.
- LANKFORD, John & SLAVINGS, Ricky L., *American astronomy, community, careers, and power, 1859-1940*, Chicago, University of Chicago Press, 1997.
- LOWELL Putnam, William, *The explorers of Mars Hill. A centennial history of Lowell Observatory. 1894-1994*, West Kennebunk, Maine, Phoenix Pub., 1994.
- LUMINET, Jean-Pierre, *L'invention du Big Bang*, Paris, Le Seuil, 1997.
- PYENSON, Lewis & SHEETS-PYENSON, Susan, *Servants of Nature. A history of scientific institutions, enterprises and sensibilities*, New York-Londres, WW Norton and Co., 1999.

- SHAROV, Alexander S. & NOVIKOV, Igor D., *Edwin Hubble, the discoverer of the big bang universe*, Cambridge, Cambridge University Press, 1993.
- SMITH, Robert W., *The expanding Universe, Astronomy's « Great Debate », 1900-1931*, Cambridge, Cambridge University Press, 1982.
- WRIGHT, Helen, *Explorer of the universe. A biography of George Ellery Hale*, New York, American Institute of Physics, 1994.

