De la Voie Lactée à la Galaxie



F. Mignard

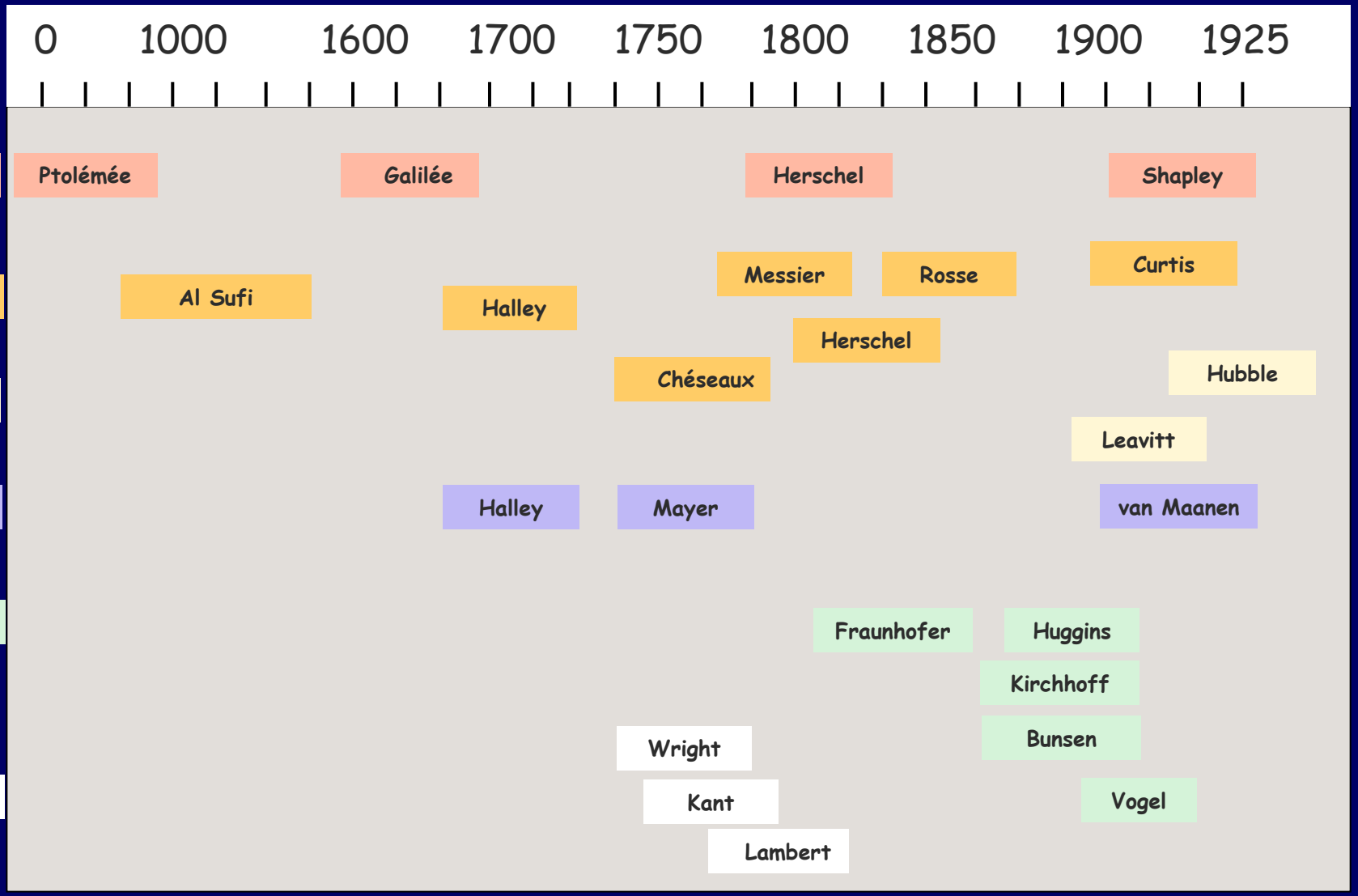
UNS/OCA/ Lagrange

Crédit : Michael Shainblum

Plan de l'exposé

- La Voie Lactée jusqu'en 1750
- Les Nébuleuses
- La Spectroscopie
- Le Grand Débat
- La Voile Lactée devient une Galaxie

Cheminement



La question astronomique

- La constitution de la **Voie Lactée** et de la distribution des étoiles n'est pas un problème central de l'Astronomie avant 1900

Ouvrage	année	Etoiles	Nébuleuses/VL	# pages
- Almageste (Ptolémée)	~150		4 p	
- L'Astronomie de Lalande	1792	35 sect.	8 sect	4200
- J. Herschel Treat. Astro.	1838	14 p	5p	220
- J. Herschel Outline of Astr.	1850	70p	30p	650
- R. Grant Hist. Physical Astron.	1852	25p	13p	630
- A. Guillemin Le Ciel	1870	70p	50p	720
- Ch. Delaunay Cours Astron.	1870	8 p	7p	650
- F. Hoefer Hist. Astron.	1872	8 p	7p	650
- R. Wolf Geschichte Astron.	1877	10 p	8p	800

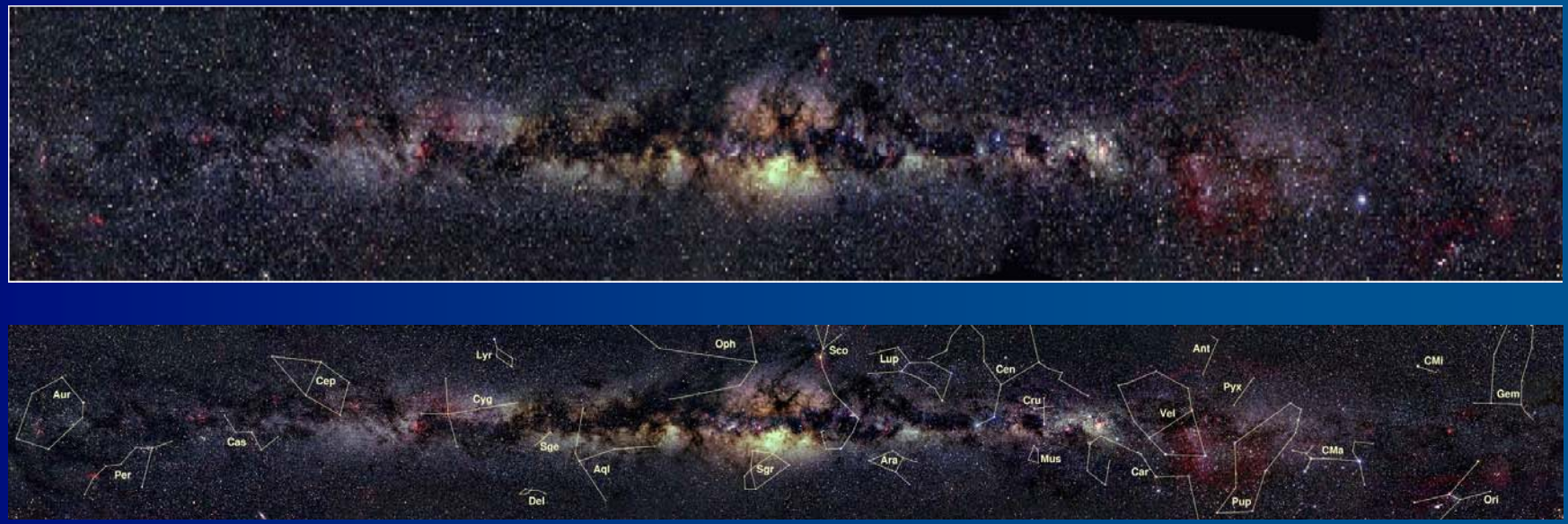
La question astronomique

	Ouvrage	année	Etoiles	Nébuleuses/VL	
-	S. Newcomb Popular Astronomy	1875	40 p	25p	530
-	C. Flammarion Astr. Populaire	1885	70 p	20p	850
-	A. Clerke Hist. Astr. XIXe siècle	1885	55p	30p	400
-	A. Clerke System of stars	1890	300p	100p	400
-	Ch. André Astro. Stellaire	1898			
-	S. Newcomb The Stars	1901	170p	120p	300
-	Ch. Moulton Intro. Astronomy	1912	40p	7p	550
-	H. Bouasse Astron. théorique	1918	30p	0p	600
-	Astronomie *La Pléiade*	1960	200 p	130p	1800
-	Motz-Duveen Astronomy	1966	230 p	130p	630
-	Vogt Outline Astronomy	1975	170 p	140p	550



JS BDL 2014

- Observation du ciel
  - visibilité des étoiles à l'œil nu
  - environ 3000 étoiles d'un lieu donné
  - une longue structure diffuse et blanchâtre traverse le ciel



La Voie Lactée

- Traînée blanche et diffuse évidente dans le ciel
- Trace à peu près un grand cercle de la sphère céleste
  - géométrie bien discutée par Ptolémée
    - grand cercle
- Décrite dans toutes les cosmologies et mythologies
  - Égypte : Oeuvre d'Isis
  - Incas : fleuve de poussières d'or
  - Grèce : Allaitement d'Héraclès
  - Chine : 银河 yínhé : (rivière d'argent)
  - Arabes : 'chemin des étoiles'



La Voie Lactée

- Démocrite a formulé l'hypothèse qu'elle n'est que la lueur d'un grand nombre d'étoiles
- On retrouve cet élément chez Aristote
  - mais discute également une origine atmosphérique
- Solution présentée comme naturelle par Averroès et dans les manuels de la Renaissance



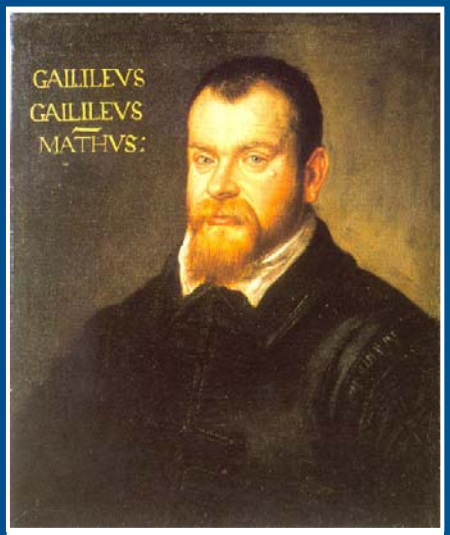
"Les étapes finales conduisant à une explication correcte de la nature de la Voie Lactée sont pour l'histoire des sciences de ces deux derniers siècles aussi difficiles à appréhender que l'a été la Voie Lactée pour les scientifiques pendant deux mille ans."

S.S Jaki, 'The Milky Way', 1973

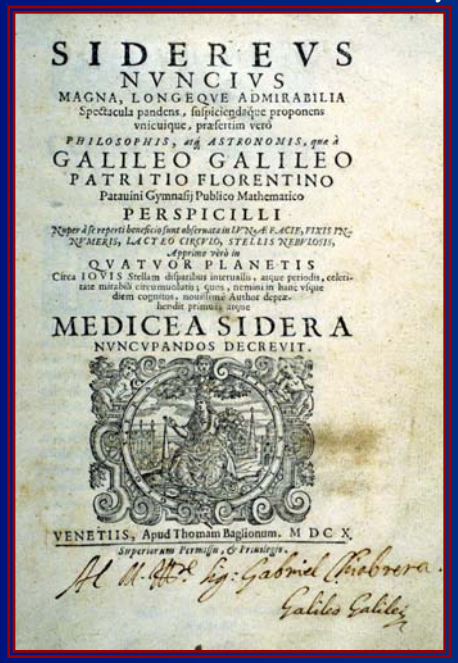
Observations de Galilée

- Mise au point de la 1e lunette astronomique : 1609 (x 20)
- Observations des planètes, de la Lune, de la Voie Lactée
- Publication du " *Messager Céleste* " en 1610
- Pour la voie lactée il résoud le débat 'Continu – discontinu' lancé par Démocrite

" La Galaxie n'est rien d'autre qu'un rassemblement d'innombrables étoiles réunies en amas"
"La multitude des petites est vraiment insondable"



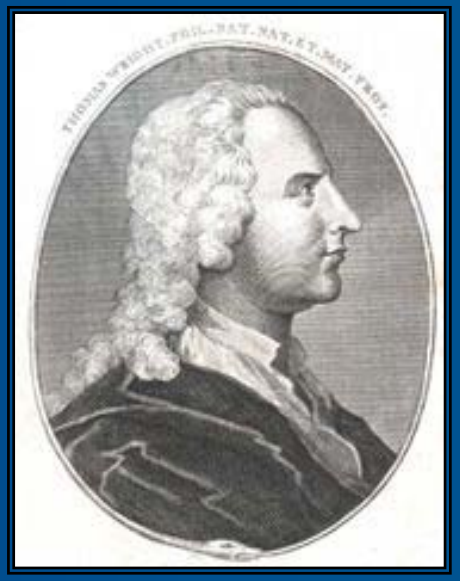
Galilée (1564-1642)


SIDEREVS
NVNCIVS
MAGNA, LONGEQVE ADMIRABILIA
Spectacula pandens, suspiciendáque proponens
vnicuique, præsertim verò
PHILOSOPHIS, nec ASTRONOMIS, quæ à
GALILEO GALILEO
PATRITIO FLORENTINO
Patauini Gymnasij Publico Mathematico
PERSPICILLI
QVATVOR PLANETIS
Circa IOVIS Stellam disparibus interuallis, atque periodis, celeritate mirabili circumuolantis; quos, nemini in hanc vsque diem cognitos, nouissimè Author deprehendit primus atque
MEDICEA SIDERA
NVNCVPANDOS DECREVIT.
VENETIIS, Apud Thomam Baglionum. M DC X.

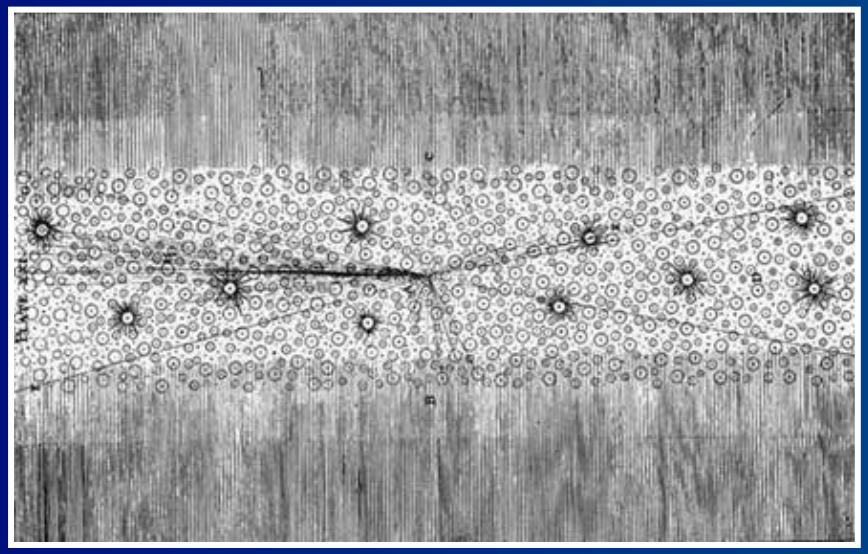


Les premiers modèles de la Galaxie

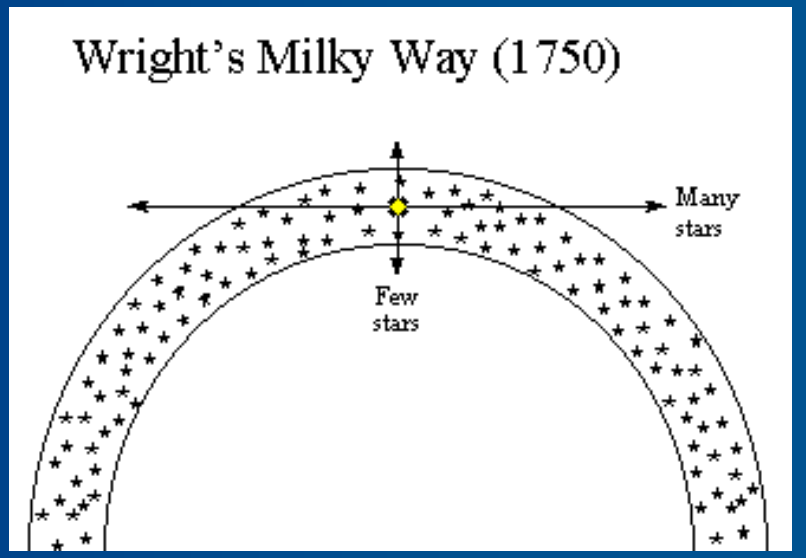
- T. Wright 1750
  - horloger, mécanicien, marin, graveur, architecte …
    " *Nouvelle Hypothèse sur l'Univers"*
  - les étoiles ne non pas distribuées régulièrement selon les directions
- Système aplati incluant le Soleil ou coquille sphérique



T. Wright 1711-1786



Principe



Les premiers modèles de la Galaxie

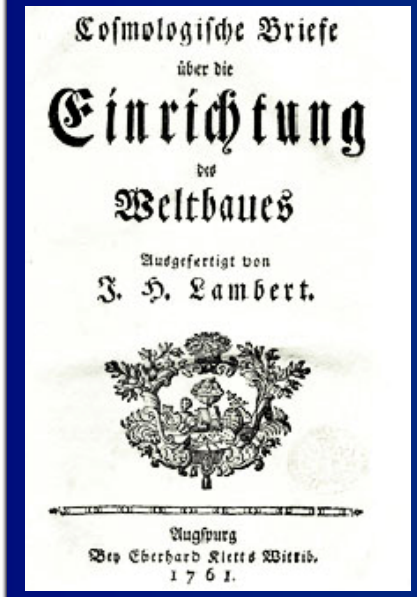
- J.H. Lambert 1761
  - autodidacte mathématicien, astronome, physicien …

" *Lettres Cosmologiques*"

  - 20 lettres sur l'arrangement de l'Univers
  - lettres impaires contenant les questions et paires avec ses réponses
  - longues discussions sur le système solaire et les comètes
  - recours assumé au principe téléologique



J.H. Lambert 1728-1777


Cosmologische Briefe
über die
Einrichtung
des
Weltbaues
Ausgefertigt von
J. H. Lambert.
Augspurg
Bey Eberhard Klett's Witwib.
1761.

Um den teleologiſchen Gründen, deren ich mich bedient habe, ein mehreres Anſehen zu geben, habe

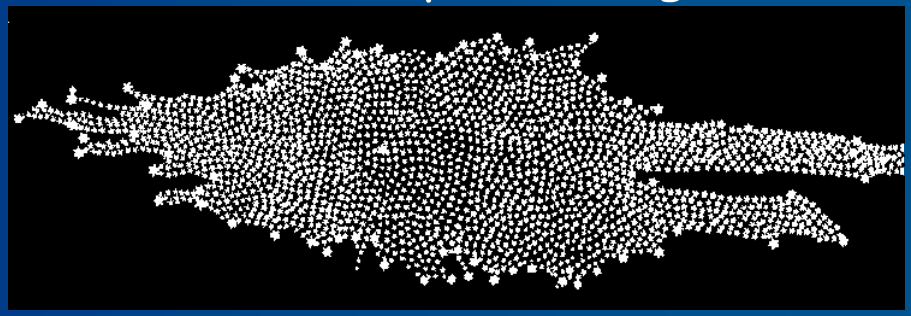
- Les étoiles ont un mouvement, donc il y a un centre attracteur
- La Voie Lactée est l'écliptique des étoiles
  - le système est le 3e niveau après les satellites et les planètes
  - c'est un disque aplati de dimension finie
  - les nébuleuses sont les traces des niveaux supérieurs

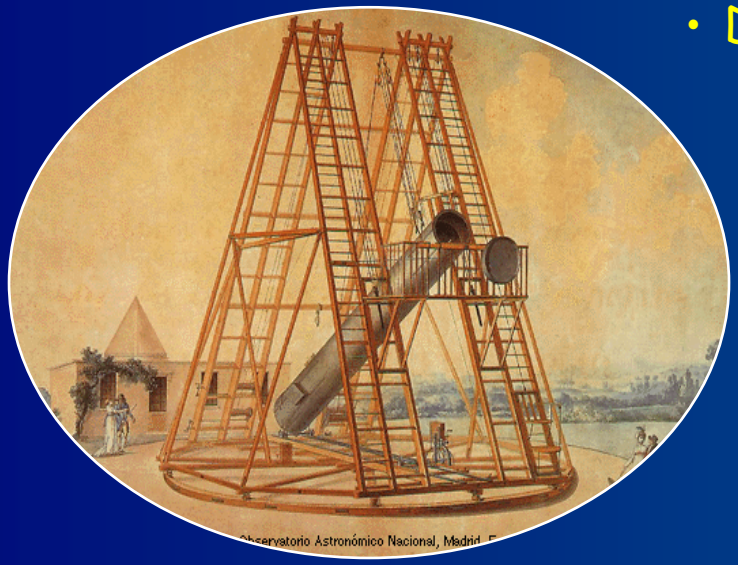
Découverte des galaxies



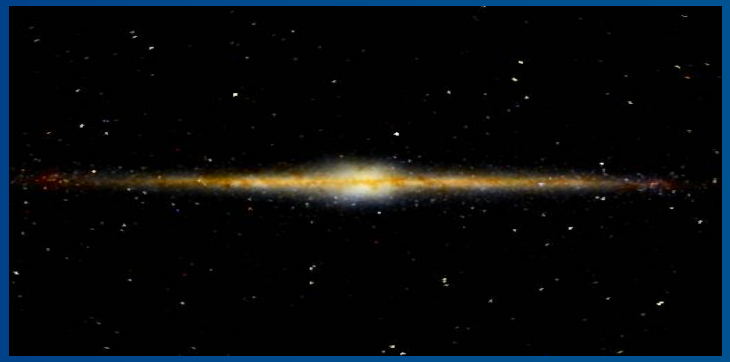
W. Herschel 1738-1822

- Hypothèse de l'Univers infini basée sur les comptages dans la Voie Lactée
- W. Herschel donne un modèle sous la forme d'une structure finie ➔ plus d'énigme de la nuit





- Débat majeur jusqu'en 1920 :
  - Univers = La voie Lactée
  - Les Univers Iles :: les galaxies



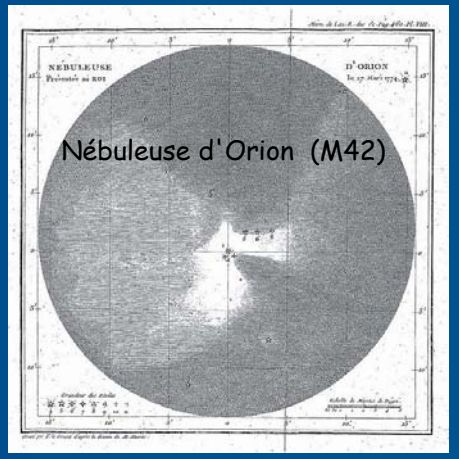
les Nébuleuses

Les nébuleuses - I

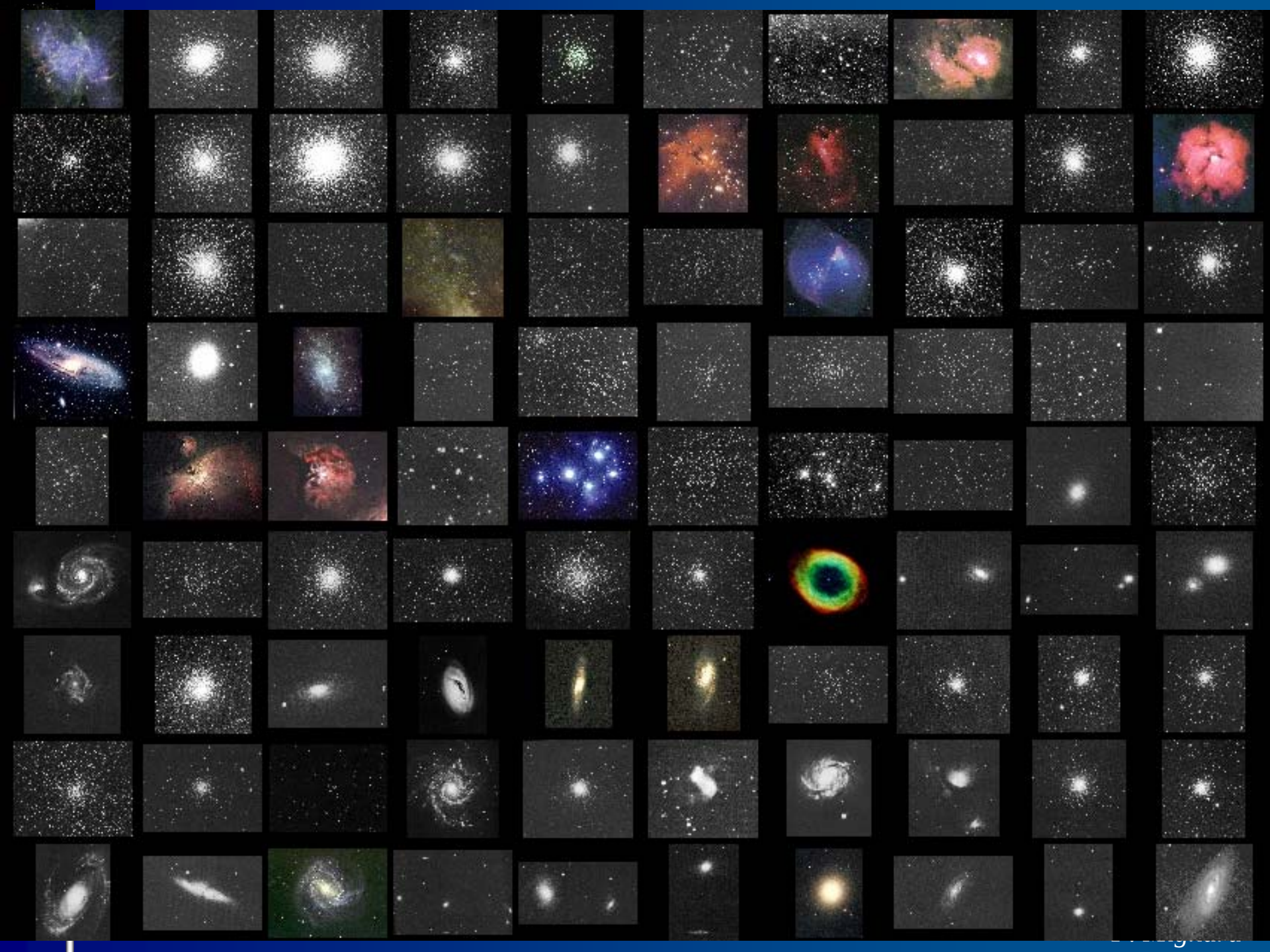
- La nébuleuse d'Andromède est indiquée dans une carte céleste de al Sufi au Xe siècle
- Observée à la lunette en 1612
- Quelques une recensées avant le XVIIIe siècle
  - nébuleuse d'Orion, Nuages de Magellan (Magellan)
- Charles Messier les catalogue pour éviter de les confondre avec des comètes
  - les comètes sont des objets très importants à cette époque
  - la découverte d'une comète était un évènement majeur
  - M1 est la nébuleuse du Crabe, M44 les Pléiades
  - son catalogue comprend 103 sources étendues, diffuses
  - aucune information sur leur nature mais classement en 8 catégories selon l'aspect



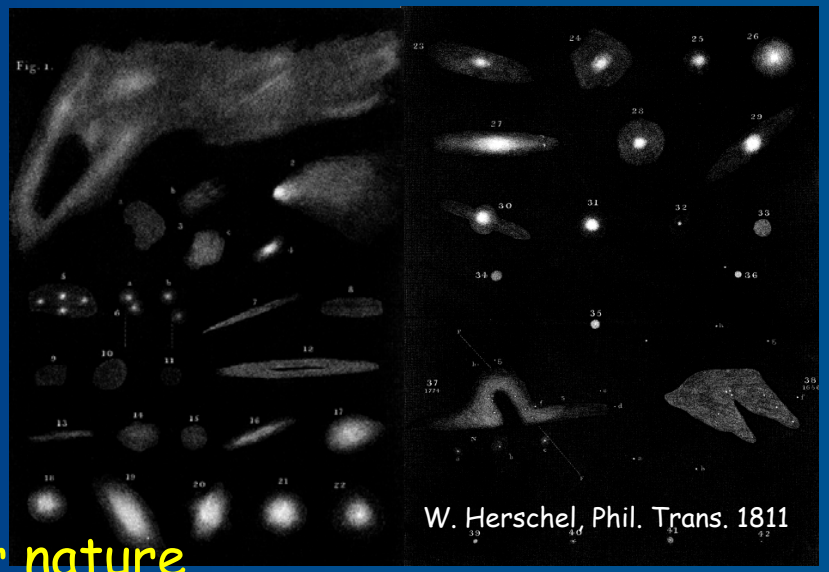
Ch. Messier (1730-1817)



Nébuleuse d'Orion (M42)



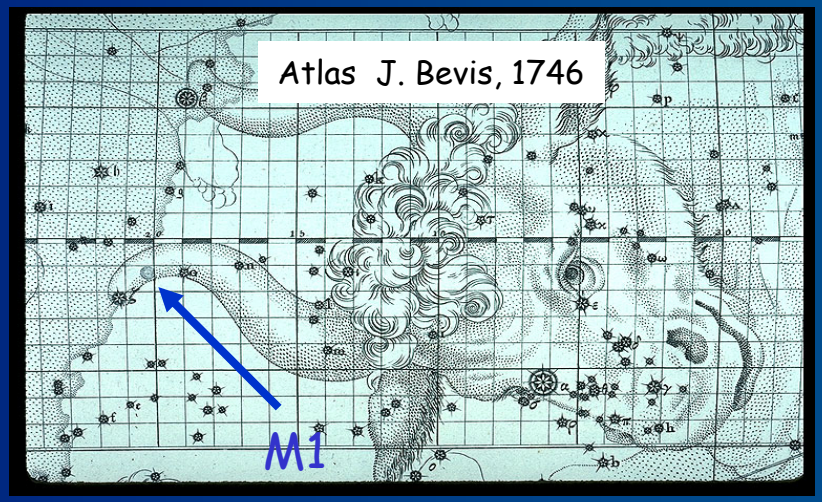
Les nébuleuses - II



- Extension du recensement avec W & J Herschel
  - ~ 3000 cataloguées en 1820
- Le véritable problème demeure leur nature
- Plusieurs sont résolues en étoiles
  - plus le télescope est puissant, plus le nombre de nébuleuses résolues augmente
- Idée générale : ce sont toutes des amas d'étoiles, certains trop lointains pour que l'on puisse voir les étoiles

Les nébuleuses - III

- Questions
  - est-ce que toutes les nébuleuses sont des agrégats d'étoiles ?
  - Appartiennent-t-elles à la Voie Lactée ?
  - Sont-elles des Galaxies à part entière ou des modèles réduits ?
    - qu'est-ce que l'Univers ?
    - autres mondes, autres systèmes solaires ?
- Le sujet domine l'astronomie sidérale du XIXe siècle



Situation en 1850

- Recensement de plus en plus précis
- Télescope de 72 pouces de Lord Rosse
  - plus de nébuleuses résolues en étoiles
- Découverte des structures spirales
  - relation avec l'hypothèse de Laplace

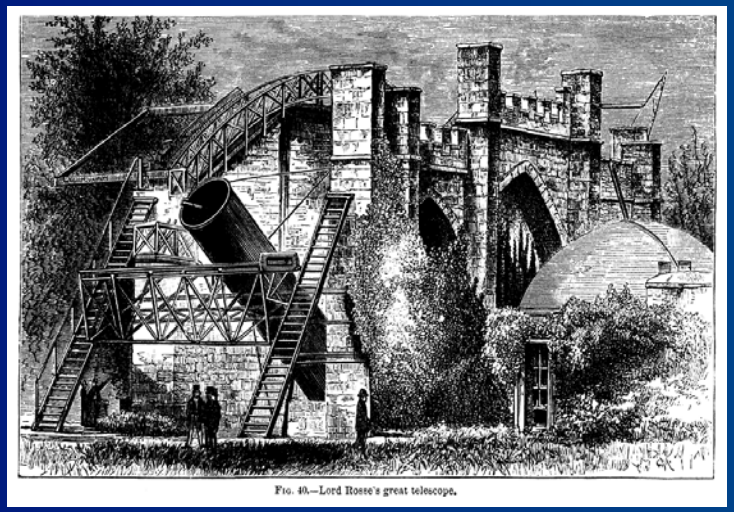
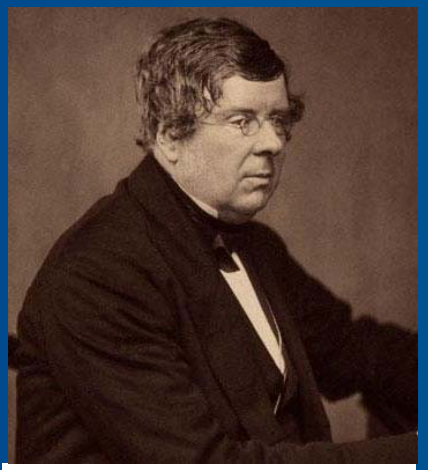
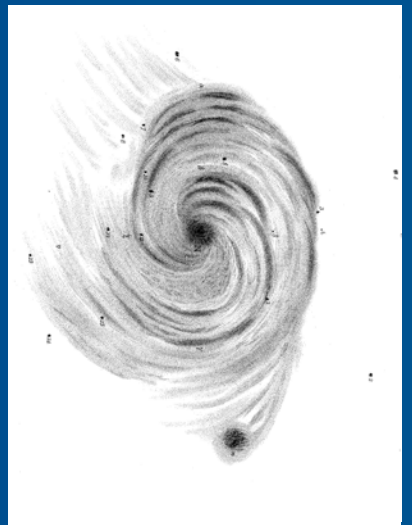


Fig. 40.—Lord Rosse's great telescope.



W. Parsons 1800-1867



M51 vue par Lord Rosse

- Débat permanent sur la nature des nébuleuses
  - agglomération d'étoiles ou nuages de gaz lumineux

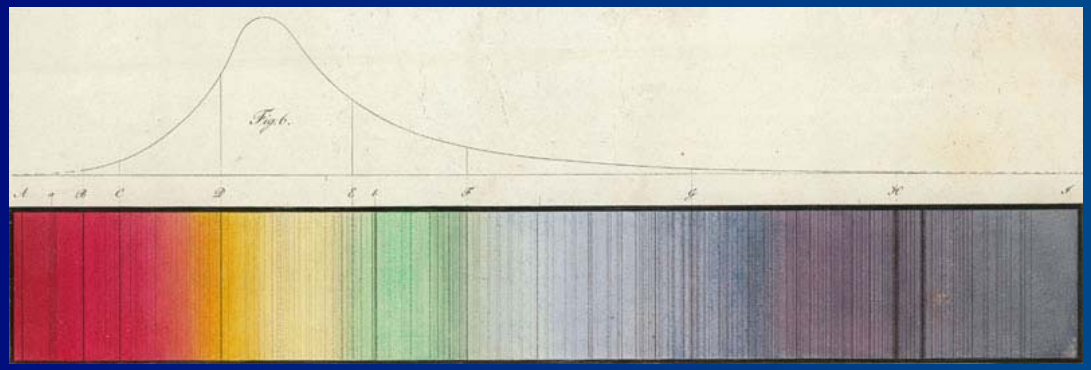
la spectroscopie

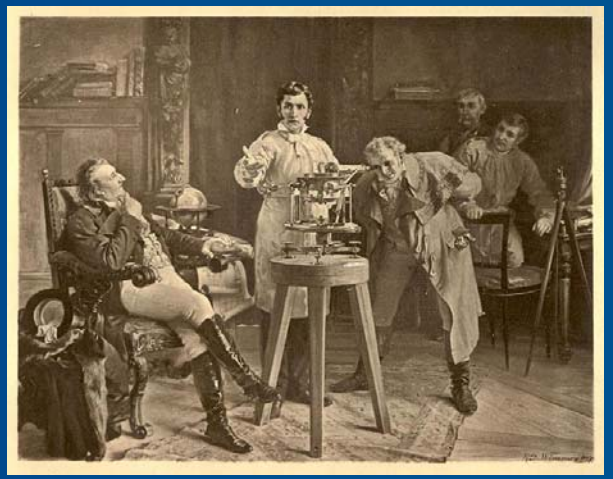
L'analyse spectrale - I

- Véritables débuts avec J. Fraunhofer en 1814
  - construit le premier spectroscope à prismes
  - explore le spectre solaire et identifie 570 raies sombres
  - montre que la lumière des planètes et de la Lune est identique
  - discute les spectres à émission en laboratoire
  - invente le spectroscope à réseau en 1821
    - premiers essais sur les étoiles brillantes



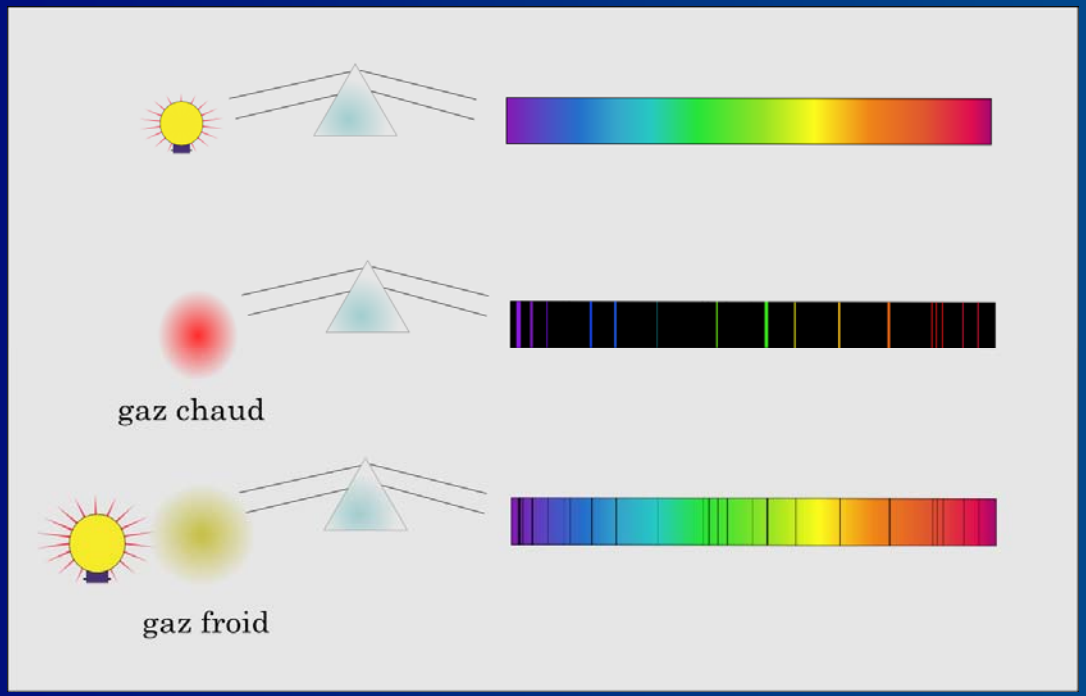
J. Fraunhofer 1787-1826





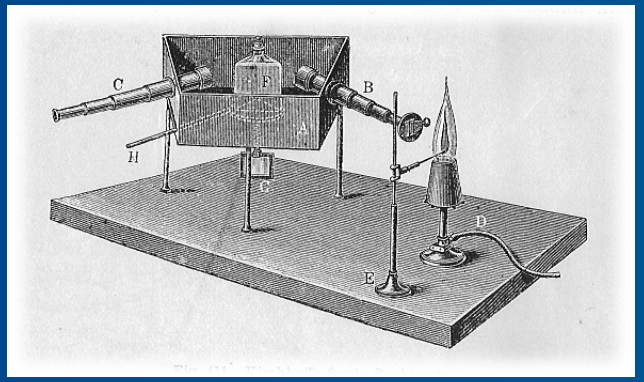
L'analyse spectrale - II

- Etapes décisives sur l'interprétation des spectres
  - production de flammes sans impuretés
  - 1859 : Wilhelm Bunsen et Gustav Kirchhoff dégagent expérimentalement les trois lois de la spectroscopie



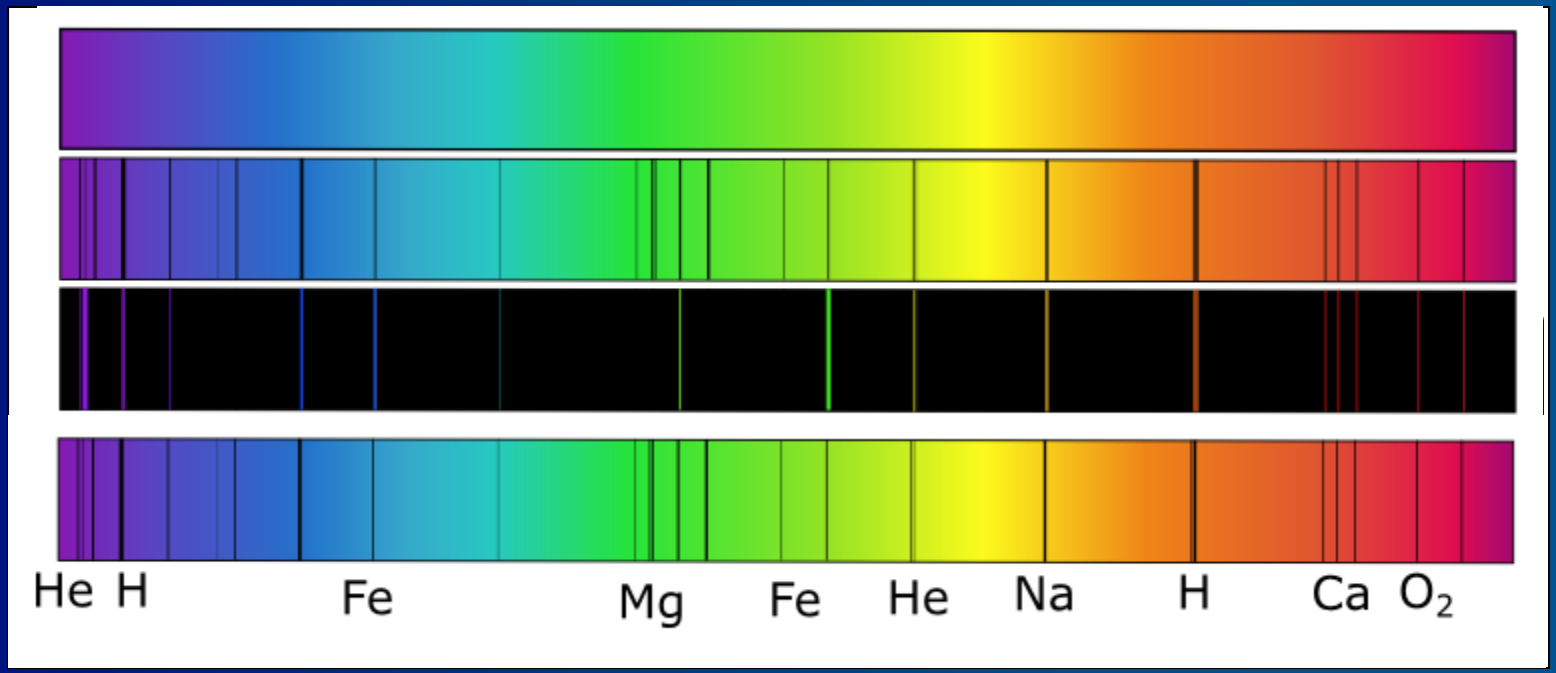


Kirchhoff - Bunsen



L'analyse spectrale - III

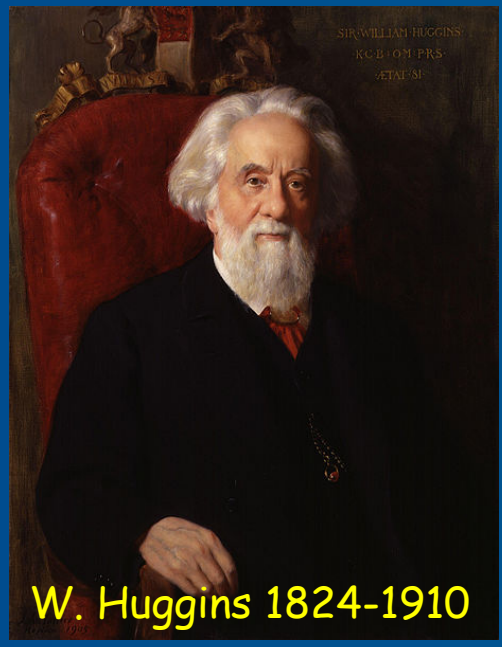
- la position des lignes est caractéristiques des éléments chimiques



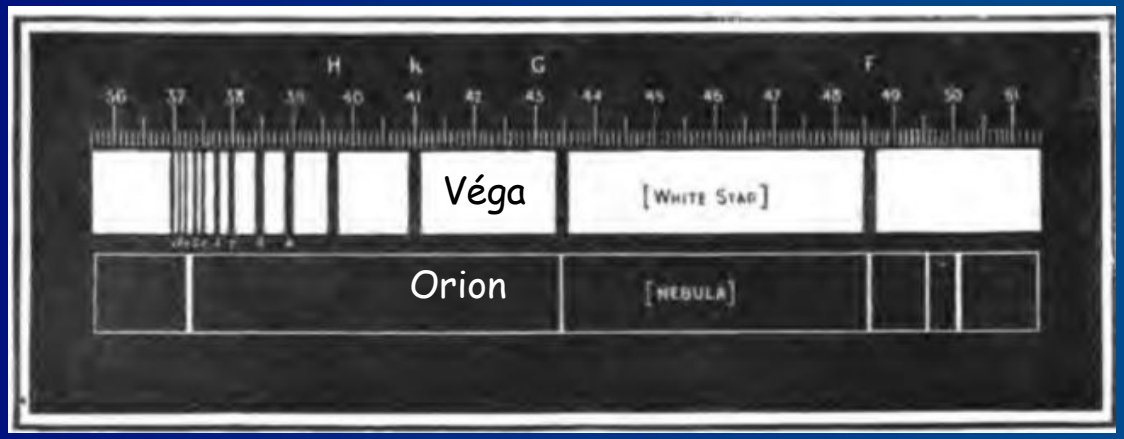
- Développements spectaculaires
  - 1859 : publication de Kirchhoff sur la composition chimique du Soleil
    - universalité de la chimie dans le système solaire
  - 1861 : Kirchhoff et Bunsen découvrent le Césium et le Rubidium

W. Huggins et la spectroscopie stellaire - I

- Riche amateur d'astronomie
- construit son propre observatoire au sud de Londres
  - lunette de 8" construite par Alvan Clark
- veut échapper aux travaux routiniers de l'astronome observateur classique
- Il s'intéresse aux travaux de Kirchoff
  - applications aux étoiles
  - problème n°1 : très peu de lumière dans les spectres



W. Huggins 1824-1910



W. Huggins et la spectroscopie stellaire - II

- Pointage vers une nébuleuse
  - nébuleuse de l'œil de chat dans le Dragon
  - 29 août 1864

"I looked into the spectroscope. No spectrum as I expected. A single bright line only.
The riddle of the nebulae was solved
Not an aggregation of stars, but a shining gas."



- Observations 1864-1866
  - 60 nébuleuses
    - 20 gazeuses (raies d'émission)
    - 40 spectres continus
      - 15 non résolues en étoiles
      - 10 amas d'étoiles
      - 15 résolubles



W. Huggins et la spectroscopie stellaire - III

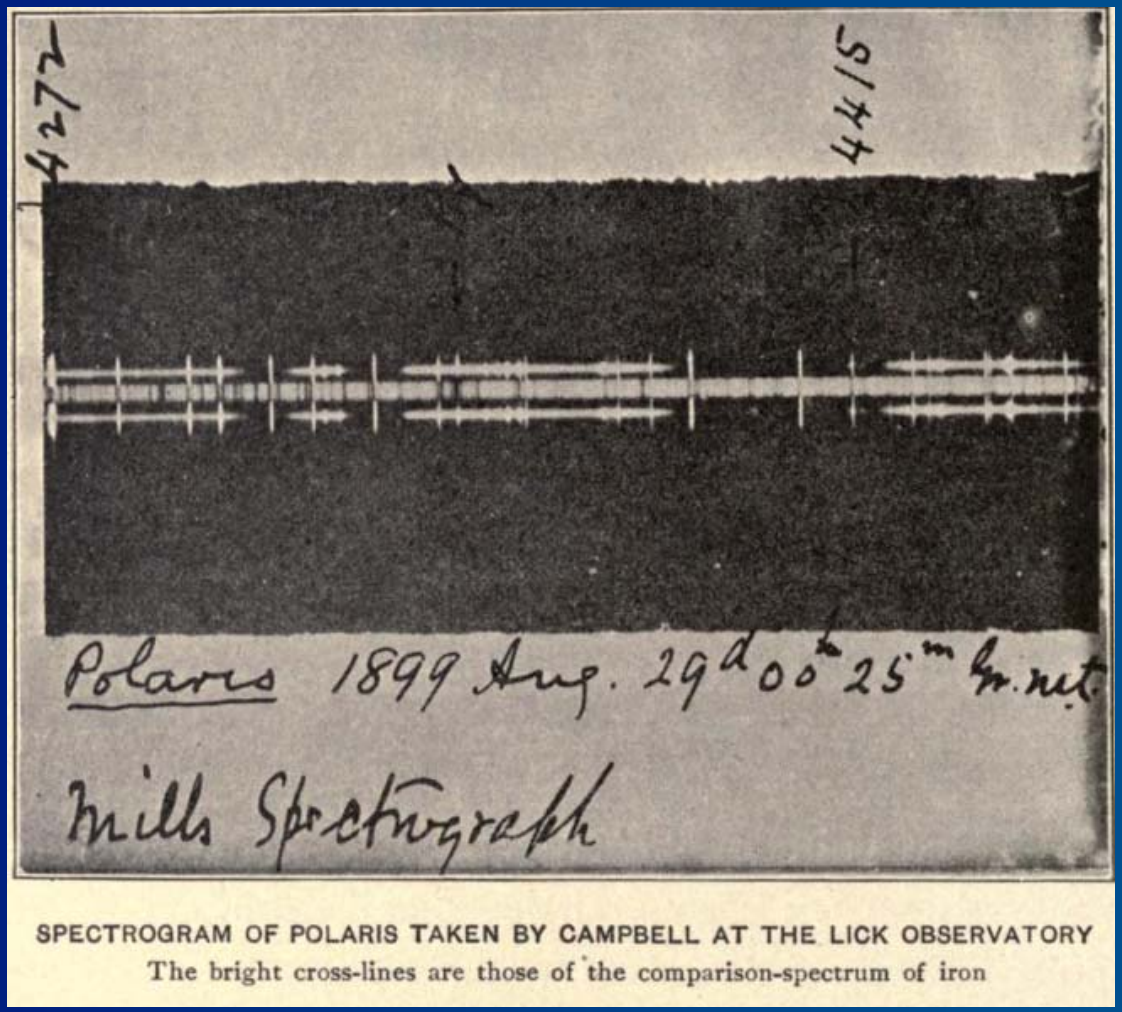
- Mesure des vitesses radiales en 1868
- déplacement des raies en raison du mouvement sur la ligne de visée
  - effet Doppler-Fizeau
  - principe énoncé dès 1841
- difficultés :
  - extrême petitesse du déplacement
  - besoin d'un spectre de référence
- Premières mesures annoncées à la Royal Society en 1868
  - V_r Sirius = + 47 km/s (aujourd'hui – 7.6 km/s)
- Progrès considérables avec la photographie
  - spectrographe
  - En 1890 H. Vogel obtient ~ – 15 km/s
- technique nouvelle et fondamentale
  - V_r + mouvement propre = ~ distance



H. Vogel 1841-1907

Les premiers spectrogrammes

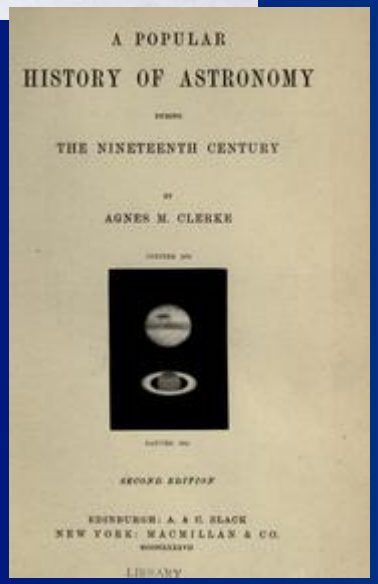
- Pour vr ~ 30 km/s $d\lambda \sim 0.5$ Å

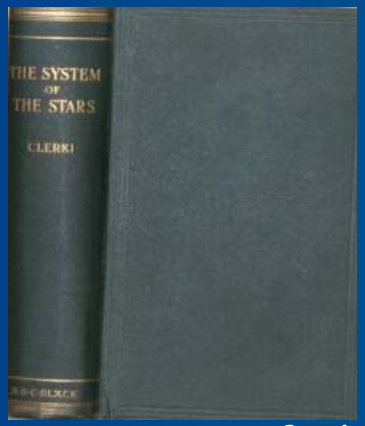


SPECTROGRAM OF POLARIS TAKEN BY CAMPBELL AT THE LICK OBSERVATORY
The bright cross-lines are those of the comparison-spectrum of iron

Etats des lieux en 1900 - I







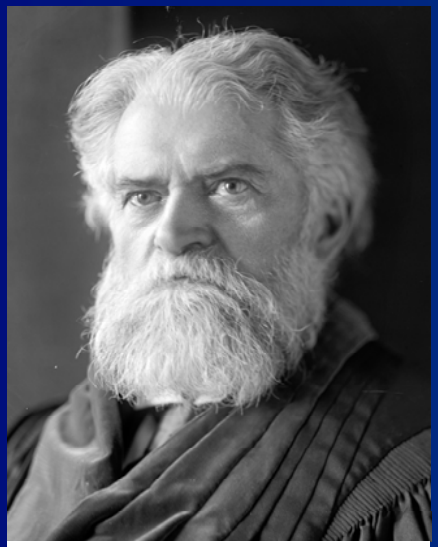
Agnes Clerke, System of the stars, 1905

"The question whether nebulae are external galaxies hardly any longer needs discussion.

No competent thinker can now maintain any single nebula to be a star-system of comparable rank with the Milky-Way

A practical certainty has been attained …."

Etats des lieux en 1900 - II



S. Newcomb 1835-1909

S. Newcomb, 1875

This idea that the nebulæ were other galaxies was more or less in vogue among popular writers until a quite recent period, when it was refuted by the spectroscope, which shows that these objects are for the most part masses of glowing gas.

S. Newcomb, 1901

Up to the time of the spectroscope, all that astronomers could do with nebulæ was to discover, catalogue, and describe them.


le Grand Débat

Modèle de J. Kapteyn (~1906-1920)



J. Kapteyn
1851-1922

Etudie les mouvements systématiques des étoiles

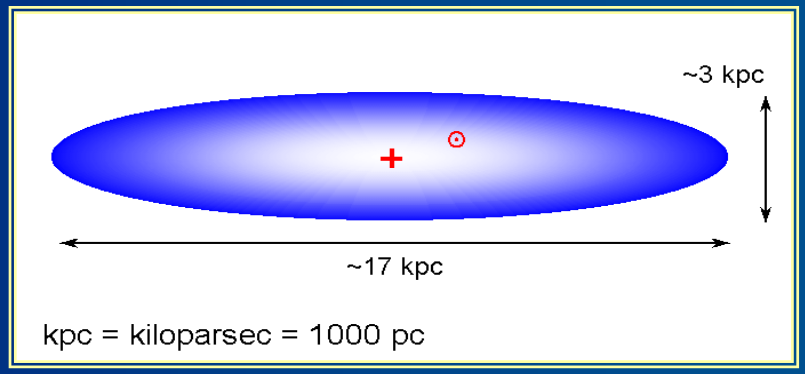
- découvre l'existence de deux courants de directions opposées
  - résultat lié à la rotation de la Galaxie

Entreprend un comptage systématique des étoiles

- Plus de 200 zones
- collaboration de 40 observatoires
  - positions, mouvement, distances, vitesses radiales
  - magnitudes, type spectraux
  - plusieurs 10^5 étoiles

Aboutit au modèle d'une Galaxie aplatie de 40,000 al

- les nébuleuses sont probablement à l'extérieur
- Le Soleil est pratiquement au centre

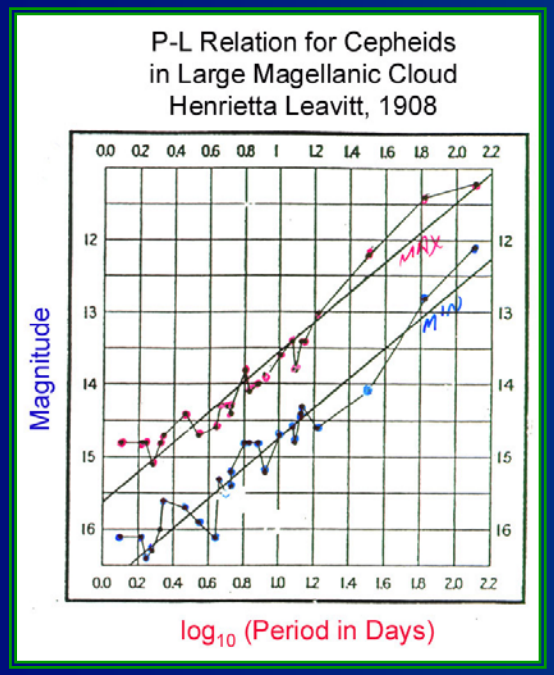


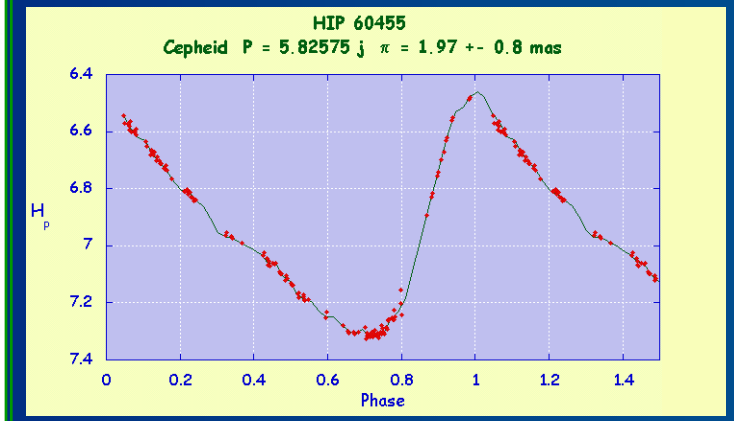
Distances avec les Céphéides



H. Leavitt 1868-1921

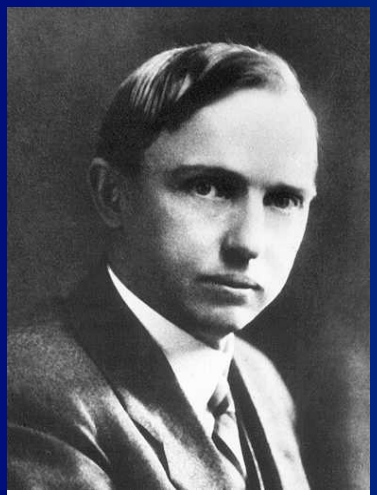
- Céphéides : étoiles pulsantes ~1000 fois la luminosité du Soleil
- Travaux de H. Leavitt
  - Analyse de 1777 étoiles variables du petit nuage de Magellan
  - étoiles toutes à la même distance
  - relation simple entre la période et la luminosité
- Mesures de quelques distances pour étalonner la formule ➔ en pratique tâche très délicate







Travaux de H. Shapley (~1916)



H. Shapley
1885-1972

Etudie les positions des amas globulaires

- groupes de ~ 10^6 étoiles dans le halo de la Galaxie
- détermine des distances avec des étoiles variables
  * Céphéides et RR Lyr

Il étalonne les distances de 7 amas globulaires

- avec les étoiles brillantes obtient les distances de 28 amas
- il montre que les amas globulaires forment une distribution sphérique

Aboutit au modèle d'une Galaxie aplatie de 300,000 al

les nébuleuses sont probablement à l'intérieur

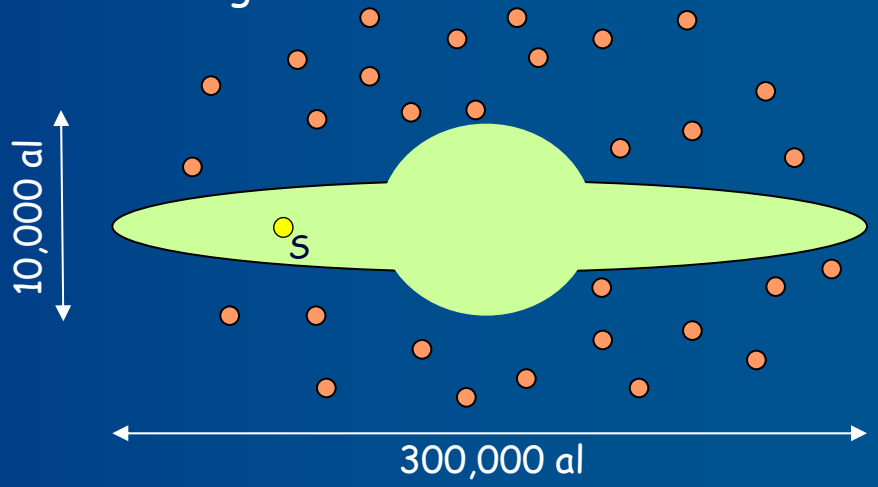
Le Soleil est éloigné du centre

Le centre galactique dans le Sagittaire

STUDIES BASED ON THE COLORS AND MAGNITUDES IN STELLAR CLUSTERS[1]

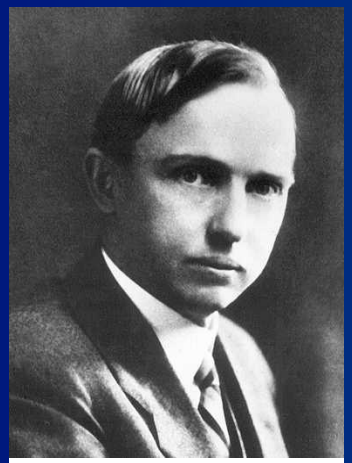
FOURTEENTH PAPER: FURTHER REMARKS ON THE STRUCTURE OF THE GALACTIC SYSTEM

By HARLOW SHAPLEY and MARTHA B. SHAPLEY



Le Grand Débat - I

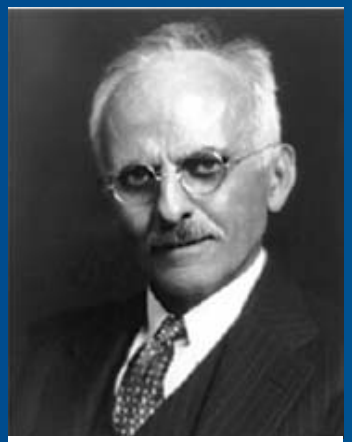
- Débat public sur la structure de l'Univers le 26 Avril 1920
- Organisé par l'Académie des Sciences des Etats-Unis
  - Harlow Shapley et Heber Curtis
  - Musée d'Histoire Naturelle à Washington
- Quatre questions abordées
  - dimension de la Voie Lactée
  - position du Soleil dans la Voie Lactée
  - Distances des nébuleuses spirales
  - Ces nébuleuses sont-elles des galaxies (étoiles) ou des nuages de gaz



H. Shapley
1885-1972



Andromède, 1888



H. Curtis
1872-1942

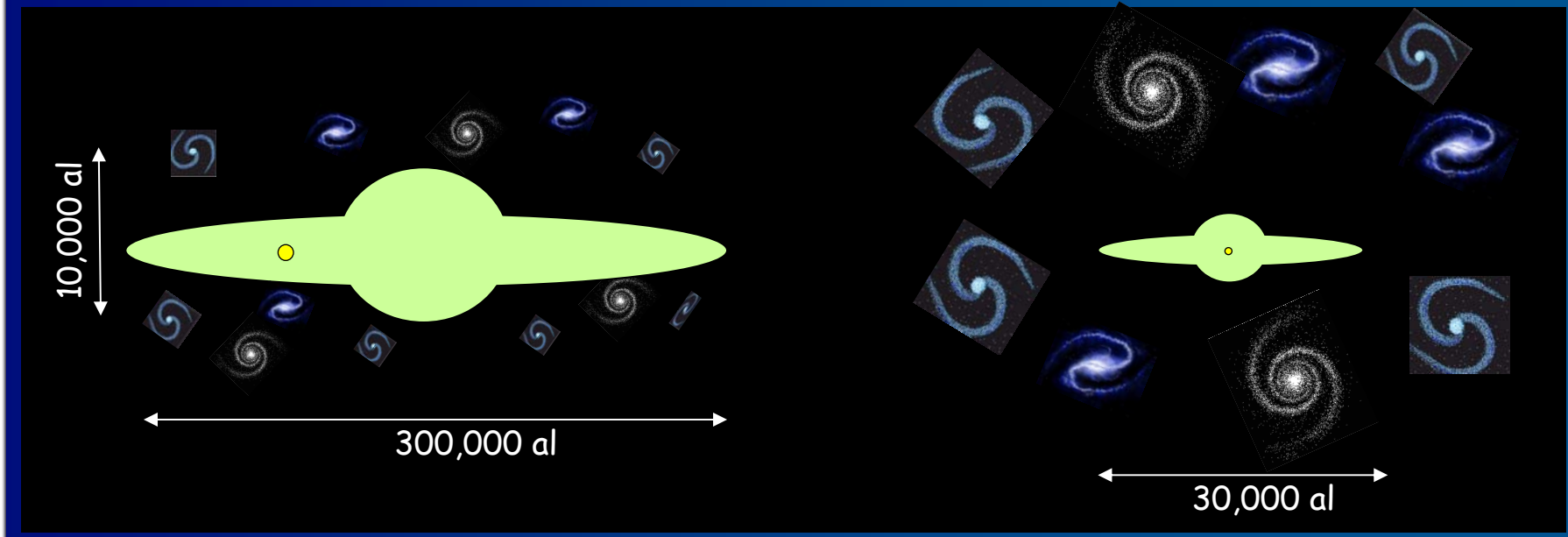
Le Grand Débat - II

H. Shapley

- Une très grande Galaxie
  - 300,000 al de diamètre
- Soleil éloigné du centre
- Les nébuleuses sont petites et dans notre Galaxie
  - mais pas d'arguments fondamentaux sur ce point

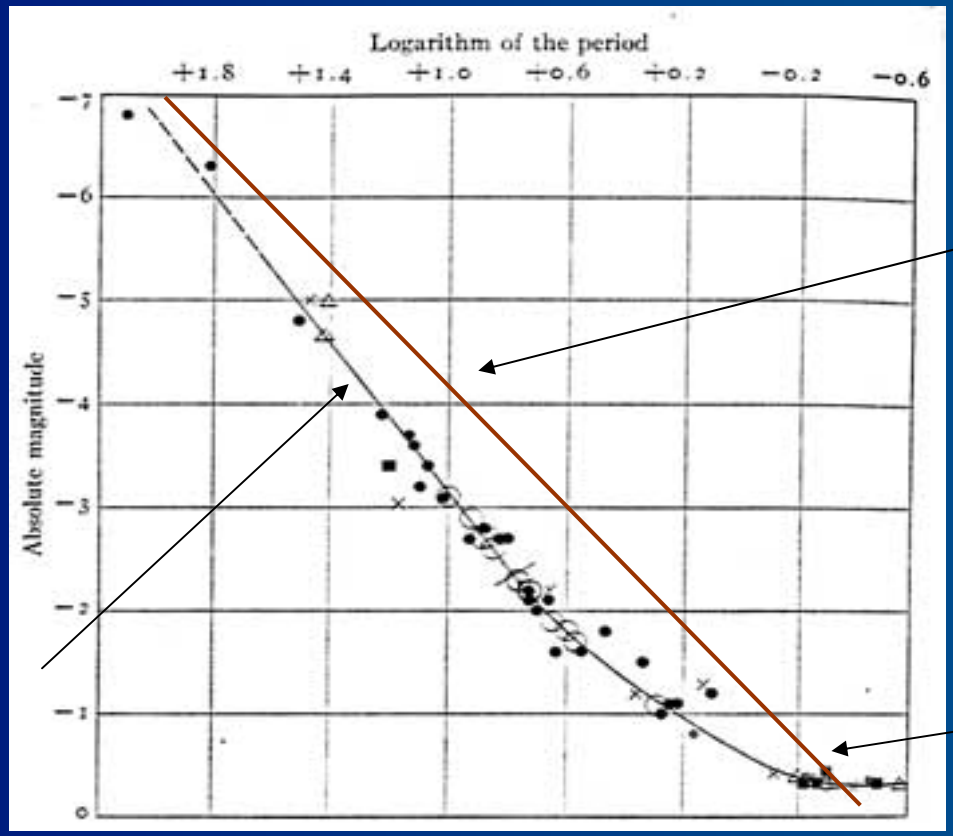
H. Curtis

- La Galaxie est de petite taille
  - 30,000 al de diamètre
- Le soleil est près du centre
- Les nébuleuses sont des galaxies à part entière
  - problème avec N 1985a
  - rejette les PM de van Maanen



Etalonnage des Céphéides

- Travail de H. Shapley
  - utilisation de Céphéides galactiques



Aujourd'hui

$\Delta M = 1 \Rightarrow 1.6 \times \text{distance}$

RR-Lyrae

Shapley

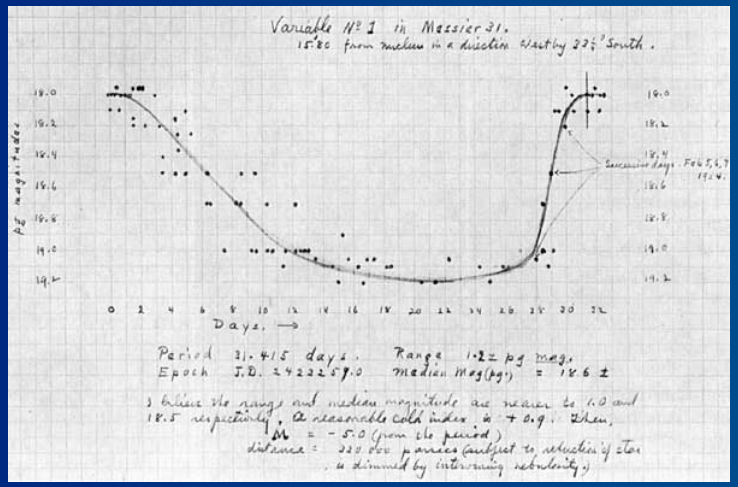
H. Shapley, 1918, Etalonnage de la relation PL

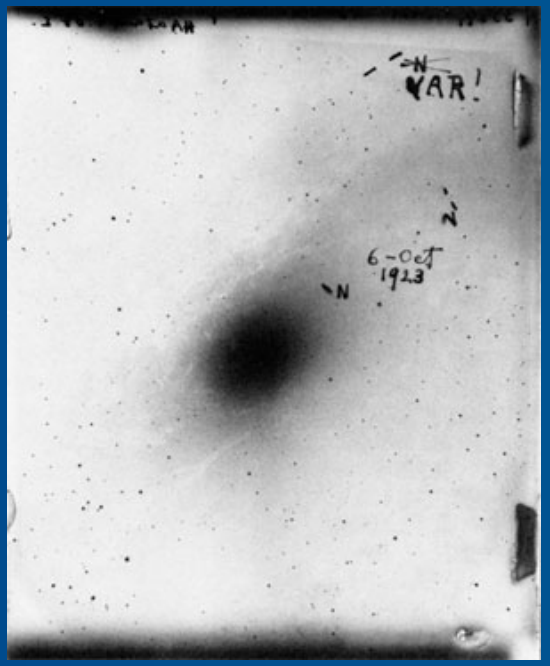
Hubble et les nébuleuses spirales

- Détermination des distances des galaxies extérieures
  - distance de Andromède avec les Céphéides
    - 135 plaques avec 12 céphéides (+65 pour M33)
  - résoud le problème fondamental de la distance
    - Andromède se trouve à 285,000 pc (aujourd'hui 700,000)



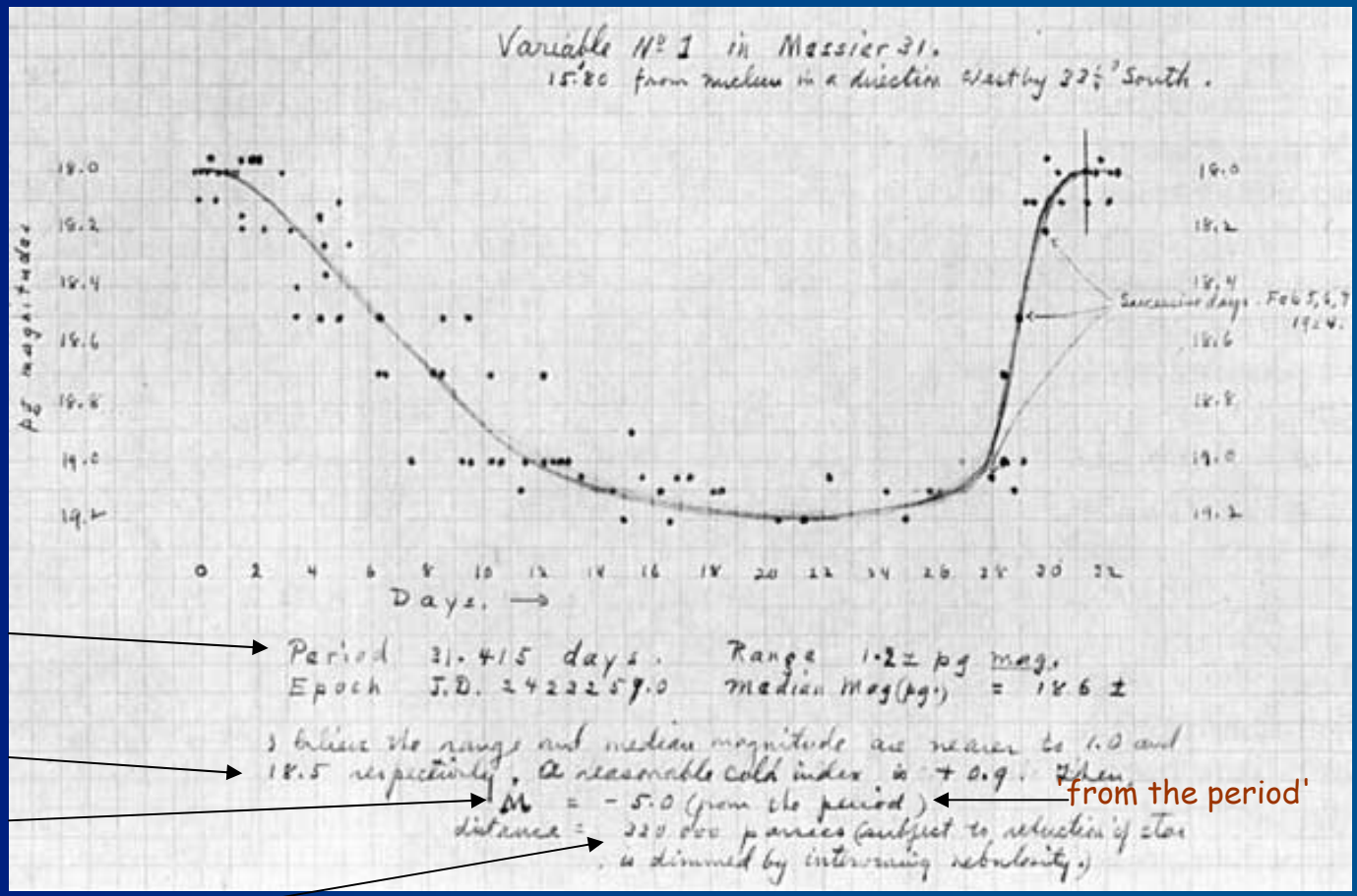
E.P. Hubble 1889-1953





Courbe de lumière d'une des Cépheides

- Lettre envoyée à H. Shapley le 29 février 1924



P = 31.415 j

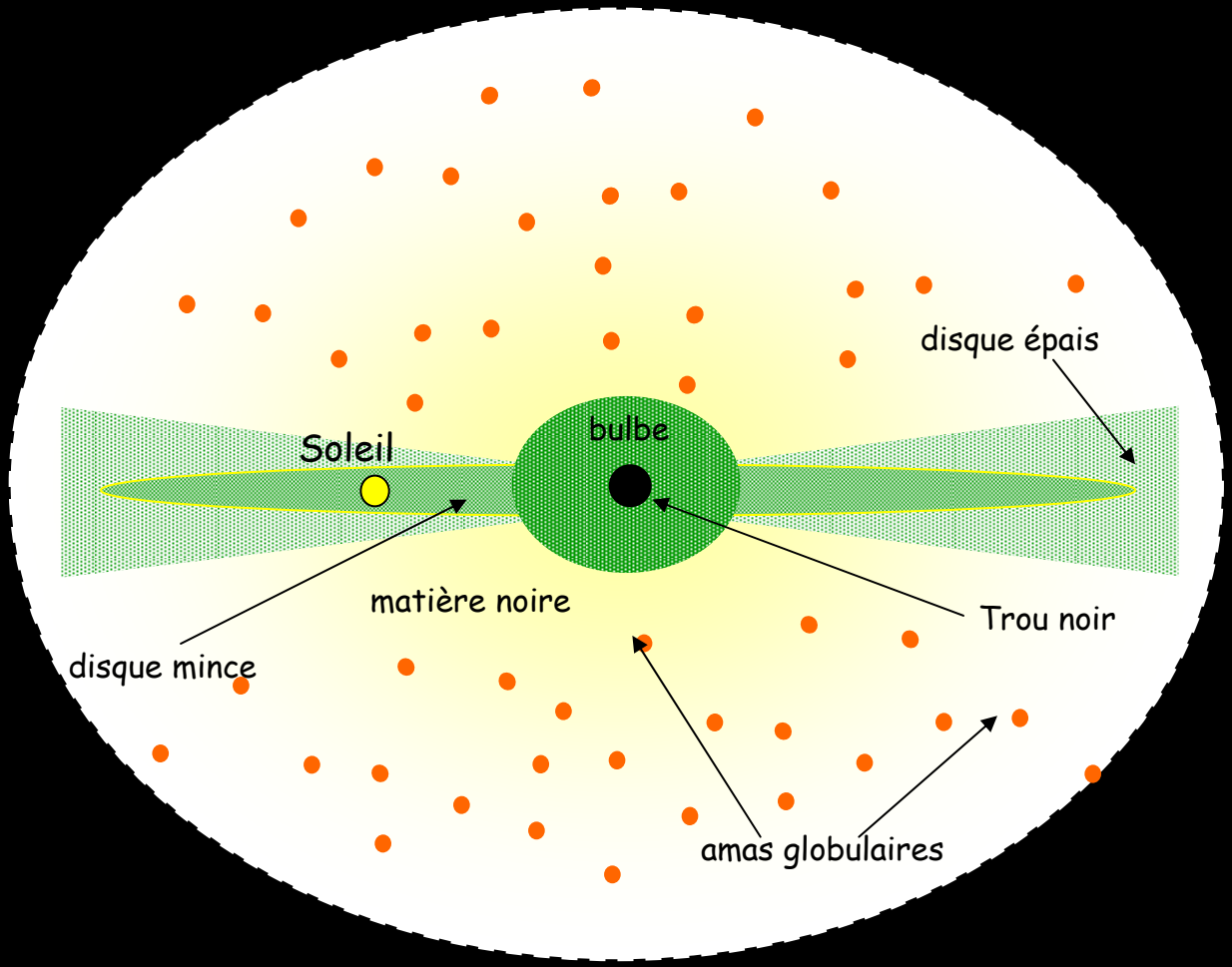
<V> = 18.5

M = -5

d = 220,000 pc

Conclusion provisoire

La suite du programme



Les grandes questions pour Gaia

- Forme globale de la Galaxie
  - gauchissement du disque
  - dimension des composantes
  - matière noire et masse de la Galaxie
  - densité de matière et potentiel galactique
- Histoire de la formation stellaire
  - populations stellaires et cinématique
  - gradient de la composition chimique
  - formation des étoiles dans les amas
- Physique stellaire générale
  - variabilité stellaire
  - distributions des naines blanches
  - systèmes binaires et multiples

Je vous remercie de votre attention



Crédit : ESO/YBeletsky