

Master Recherche M2 Astronomie & Astrophysique  
Enseignement thématique 12 (ET12) –  
Propriétés et évolution des galaxies

Chap. 1: *Galaxies: introduction et propriétés photométriques*

Chap. 2: *Propriétés statistiques des galaxies et mesure de la formation d'étoiles*

Chap. 3: *Modélisation de l'évolution des galaxies*

Chap. 4: *Histoire de la formation d'étoiles et évolution cosmologique*

Chap. 5: *La face cachée des galaxies*

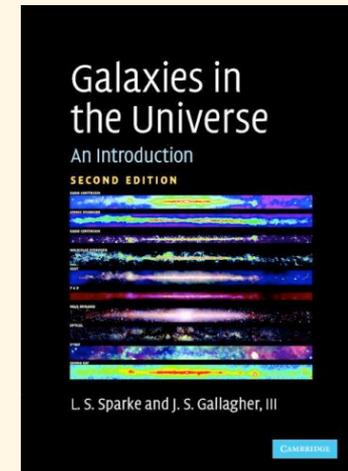
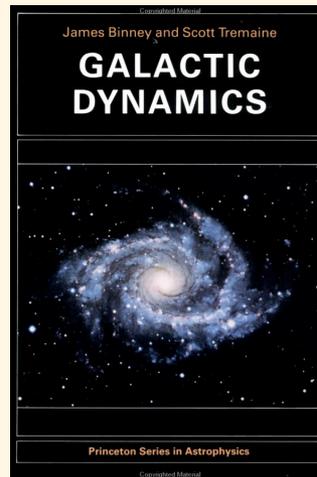
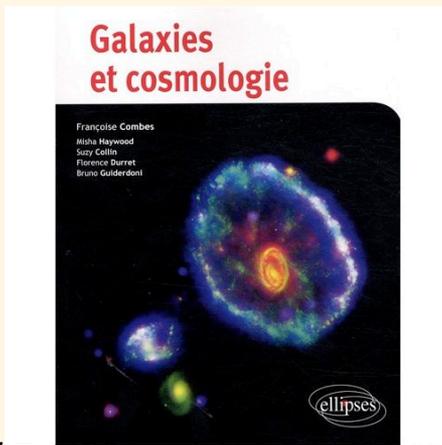
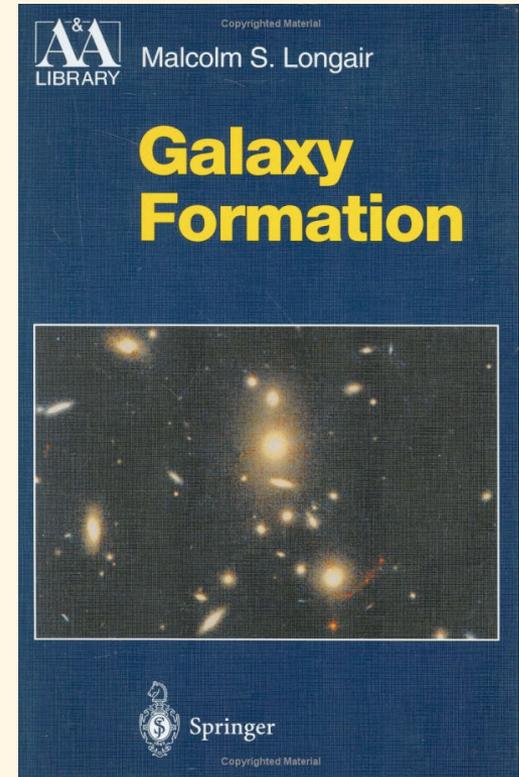
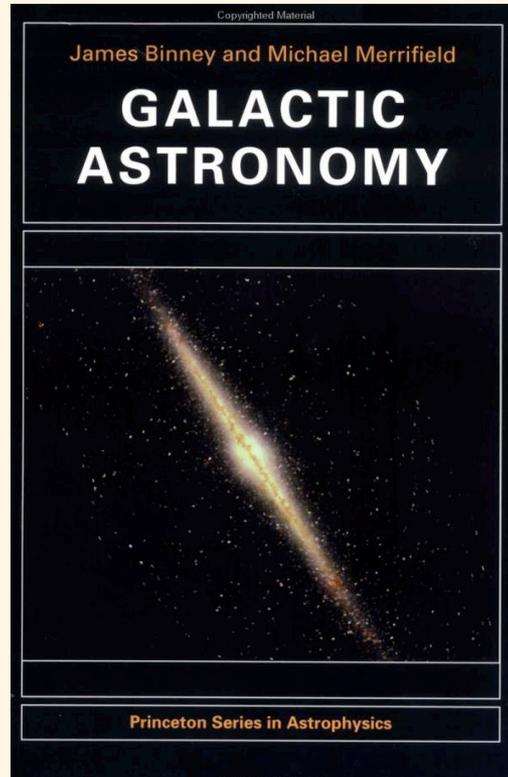
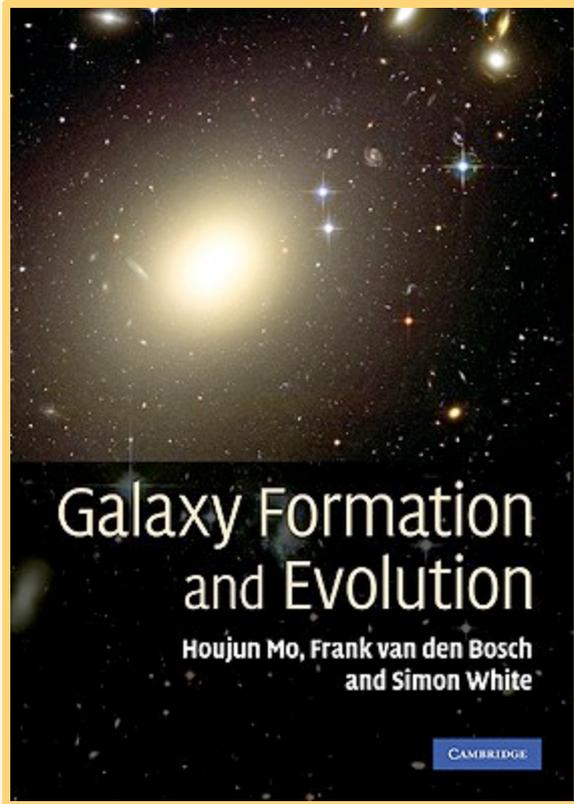
David Elbaz (delbaz@cea.fr)

[http://david.elbaz3.free.fr/master\\_m2](http://david.elbaz3.free.fr/master_m2)

Service d'Astrophysique – CEA Saclay

Tel: 01 69 08 54 39 / 07 85 80 08 79

# Livres recommandés



## Grille de lecture des publications scientifiques

Voici une suggestion de grille de lecture pour l'analyse d'articles scientifiques. Avant de se lancer dans la lecture d'un article, il est important d'avoir à l'esprit certaines questions clé qui vous permettront d'aller à l'essentiel tout en ne négligeant pas les détails qui font la force, mais aussi indiquent les faiblesses d'une étude scientifique. Cette même série de 5 questions-clés peut aussi être utilisée pour vous guider dans la rédaction d'un article scientifique.

### les 5 étapes-clés

#### 1. Quelle est la question centrale ?

La première question à se poser est de savoir quel est le **problème central** abordé par les auteurs, ce qui implique de le situer dans son **contexte** : que savait-on, ne savait-on pas ?

#### 2. Quel outil ? Quel angle d'attaque du problème ?

Les auteurs proposent un résultat nouveau. Sur quoi repose ce résultat principalement ? Quel outil ont-ils utilisé pour faire cette étude ?

- de nouvelles observations ?
- une nouvelle approche théorique ?
- les deux ?

#### 3. Quel résultat principal ?

La plupart des publications mélangent un grand nombre de résultats, parfois nouveaux, parfois seulement des confirmations ou des répétitions d'autres études, au milieu desquels il faut apprendre à extraire le résultat principal et nouveau. Parfois, le résultat principal émerge d'une figure et les auteurs eux-mêmes ne l'ont pas suffisamment analysé. Il est donc utile de s'interroger non pas sur ce que les auteurs appellent eux-mêmes le résultat principal, mais sur ce que l'on pense soi-même être ce résultat.

#### 4. Quelles sont les limites de cette étude ?

Une étude n'est jamais complète et parfaite. Il y a des biais de sélection pour les observations, des hypothèses plus ou moins justifiées pour les modèles, des effets systématiques affectant les mesures qui ne sont pas inclus dans l'estimation du rapport signal-sur-bruit. Ou encore l'échantillon est limité et les extrapolations larges. Un résultat n'a donc de véritable valeur que s'il est placé dans son contexte et avec une idée de ses limites.

#### 5. Quelle suite à donner ?

La formulation d'un résultat amène souvent à poser le problème initial sous un angle nouveau, quelle est cette nouvelle problématique ? Comment l'aborder dans le futur ? Comment réduire les limites observationnelles/théoriques du résultat obtenu ? Faut-il de nouvelles observations ? Lesquelles ? Adapter les modèles ? Enfin, comment cette étude a-t-elle son angle d'attaque/son résultat/ses limites peut-elle être intégrée dans nos propres travaux/réflexions présents et futurs ?

## Lecture d'articles

Pour le Cours 2 :

Baldry, Y.K., Glazebrook, K., Brinkmann, J. et al. 2004, *Astrophysical Journal* 600, 681  
« Quantifying the bimodal color-magnitude distribution of galaxies »

Pour le Cours 3 :

Kennicutt, R.C.Jr. 1998, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 36, 189  
« Star formation in galaxies along the hubble sequence »

Pour le Cours 4 :

Madau, P., Ferguson, H.C., Dickinson, M.E. et al. 1996, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 283, 1388  
« High-redshift galaxies in the *Hubble Deep Field* : colour selection and star formation history to  $z \sim 4$  »

Comment analyser un article et quelles questions se poser pour construire la rédaction d'un article : **les 5 étapes-clés**

#### 1. Contexte & question centrale

#### 2. Apport de l'étude, nouveauté

- observations
- modélisation/théorie
- les deux ?

#### 3. Résultat principal

#### 4. Limites de l'étude

#### 5. Quelle suite ?

- nouvelle problématique
- nouvelles observations requises
- adapter les modèles

# Introduction historique

# L'univers en 3D

Copernic n'était pas le premier à proposer que la Terre tourne autour du Soleil et non l'inverse.

Aristarque de Samos avait eu la même intuition au III<sup>ème</sup> siècle avant notre ère, comme le rapporte un texte d'Archimède, et ses détracteurs ne s'étaient pas appuyés sur la religion pour refuser de déloger la Terre de sa position centrale, mais sur deux arguments dont l'un est particulièrement révélateur.

Le premier argument concerne le Soleil que l'on considère aujourd'hui comme étant naturellement au centre du système solaire puisqu'il est le plus massif des objets qui le constituent. Aucun contemporain d'Aristarque ne se doutait que le Soleil contenait 99,86% de la masse du système solaire. Bien au contraire, selon la théorie des éléments de l'époque, la tendance naturelle des flammes étant de monter vers le ciel, il était naturel d'imaginer que le Soleil, une boule de feu, soit situé vers le haut et non vers le bas, vers le centre du monde où se situait la Terre composée d'éléments lourds.

Le second argument utilisé par les détracteurs d'Aristarque et de Copernic était que si la Terre tournait autour du Soleil, on verrait les étoiles danser devant nos yeux au cours de l'année ce que personne n'a encore jamais vu ! Si les étoiles ne font pas la ronde, alors la Terre ne tourne pas autour du Soleil et Aristarque comme Copernic ont donc tort...

# « Le messager des étoiles » (*Sidereus nuncius*) [1610] Galilée

## S I D E R E V S N V N C I V S

MAGNA, LONGEQVE ADMIRABILIA  
Spectacula pandens, suspiciendaque proponens  
vnicuique, praefertim verò

PHILOSOPHIS, atq; ASTRONOMIS, quae à  
GALILEO GALILEO  
PATRITIO FLORENTINO

Patauini Gymnasij Publico Mathematico

PERSPICILLI

Nuper à se reperi beneficio sunt obseruata in LVNÆ FACIE, FIXIS IN-  
NUMERIS, LACTEO CIRCVLO, STELLIS NEBVLOSIS,

Aprime verò in

QVATVOR PLANETIS

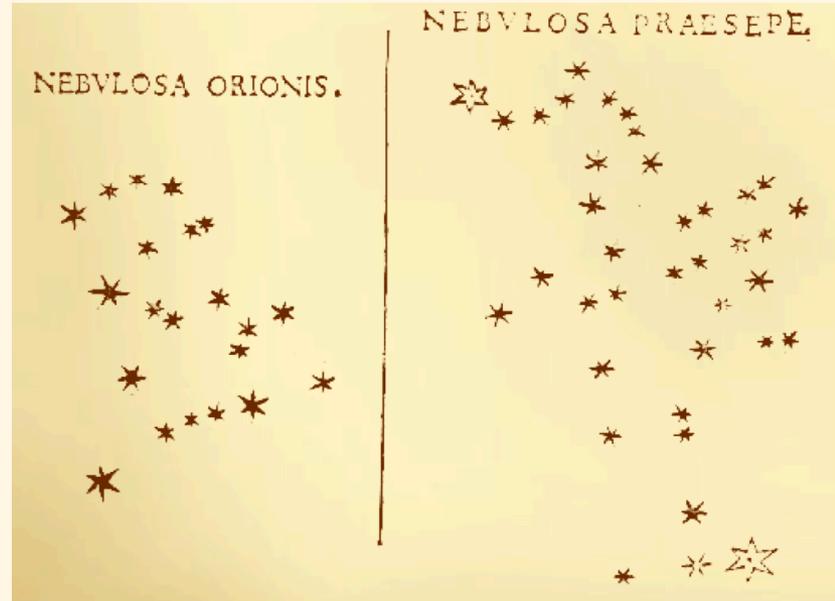
Circa IOVIS Stellam disparibus interuallis, atque periodis, celeti-  
tate mirabili circumuolutis; quos, nemini in hanc vsque  
diem cognitos, nouissimè Author depræ-  
hendit primus; atque

MEDICEA SIDERA  
NVNCVPANDOS DECREVIT.



VENETIIS, Apud Thomam Baglionum. M D C X.

Superiorum Permissu, & Privilegio.



résoud à la lunette des nébuleuses en étoiles  
→ en déduit que la Voie lactée est faite d'étoiles



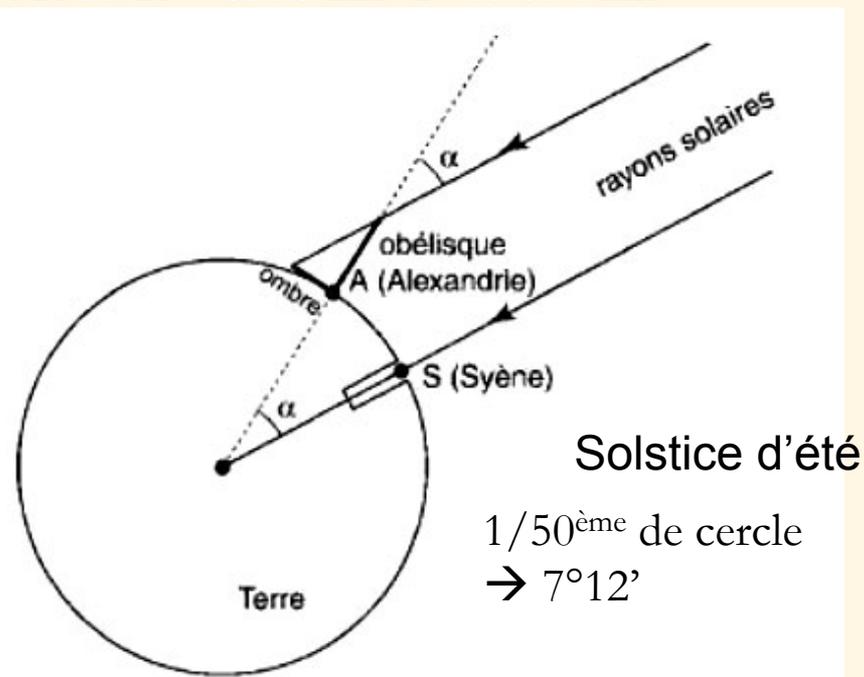
Centre du monde observable	Taille du monde observable	Taille (km)
Le centre du village « lococentrisme »	Le village et sa proche banlieue (préhistoire)	10-100 km
La Terre au centre du monde, « géocentrisme »	20 000 rayons terrestres (Ptolémée, II <sup>ème</sup> siècle)	$10^8$ km

La référence-étalon: Eratosthène mesure le rayon de la Terre (285-194 avJC)

Alexandrie – Syène / rayon de la Terre = taille de l'ombre / taille de l'obélisque

Alexandrie – Syène = 5000 stades = 830 km → Circonférence de la Terre = 41500 km

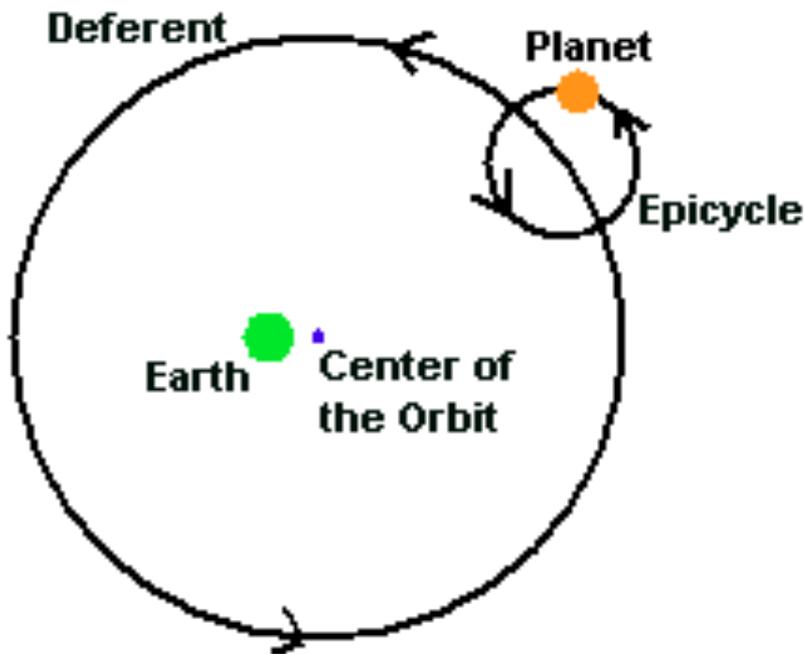
Valeur réelle =  $2 \pi R$  où  $R = 6378$  km → 40 074 km



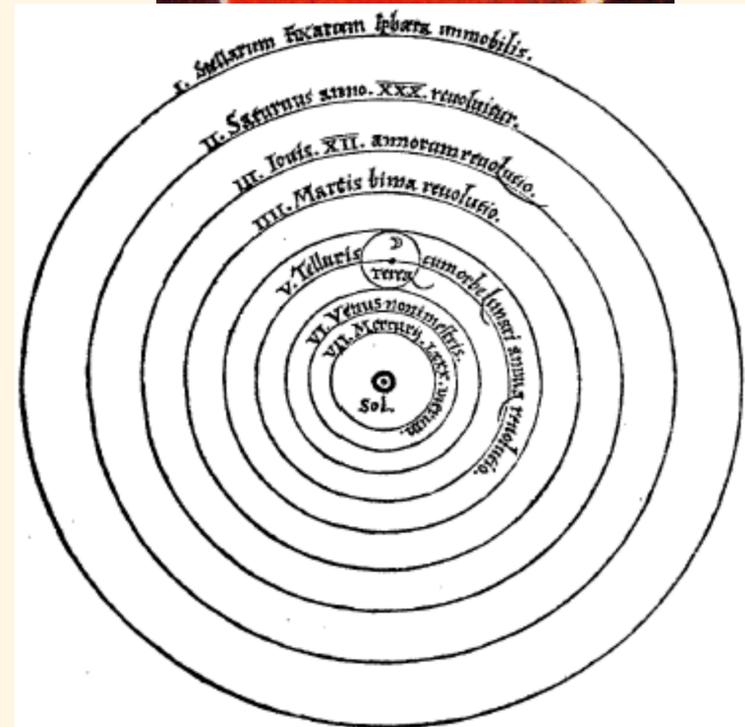
Mesure du rayon de la Terre par Ératosthène.

<b>Centre du monde observable</b>	<b>Taille du monde observable</b>	<b>Taille (km)</b>
Le centre du village « lococentrisme »	Le village et sa proche banlieue (préhistoire)	10-100 km
La Terre au centre du monde, « géocentrisme »	20 000 rayons terrestres (Ptolémée, II <sup>ème</sup> siècle)	$10^8$ km
Le Soleil au centre du monde, « héliocentrisme »	400 000 rayons terrestres (Copernic, 1543)	$10^{10}$ km

Claude Ptolémée [ 90 – 168 ]  
l'Almageste = "la Très Grande"



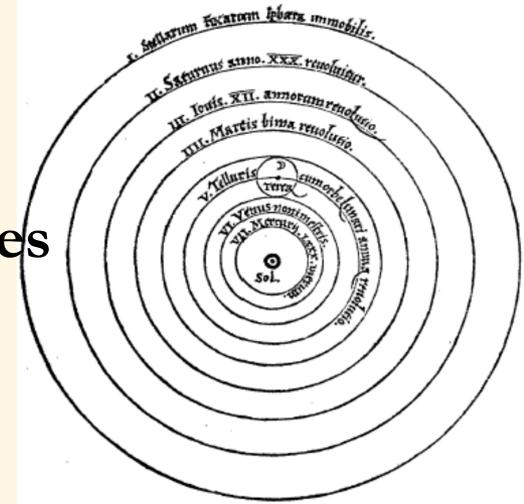
Nicolas Copernic [ 1476 – 1543 ]  
« Des révolutions des sphères célestes »



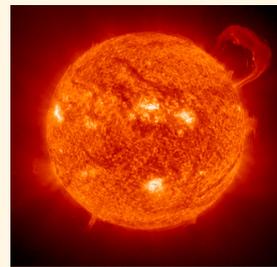
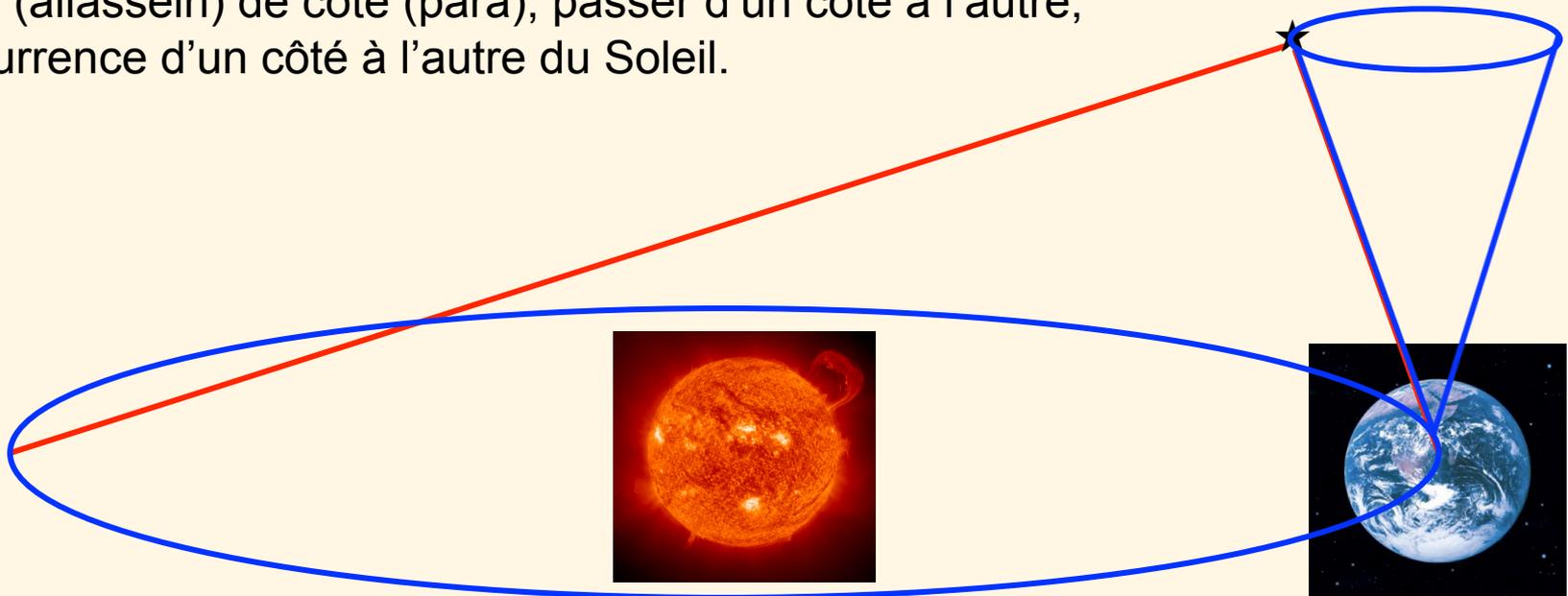


1476 - 1543

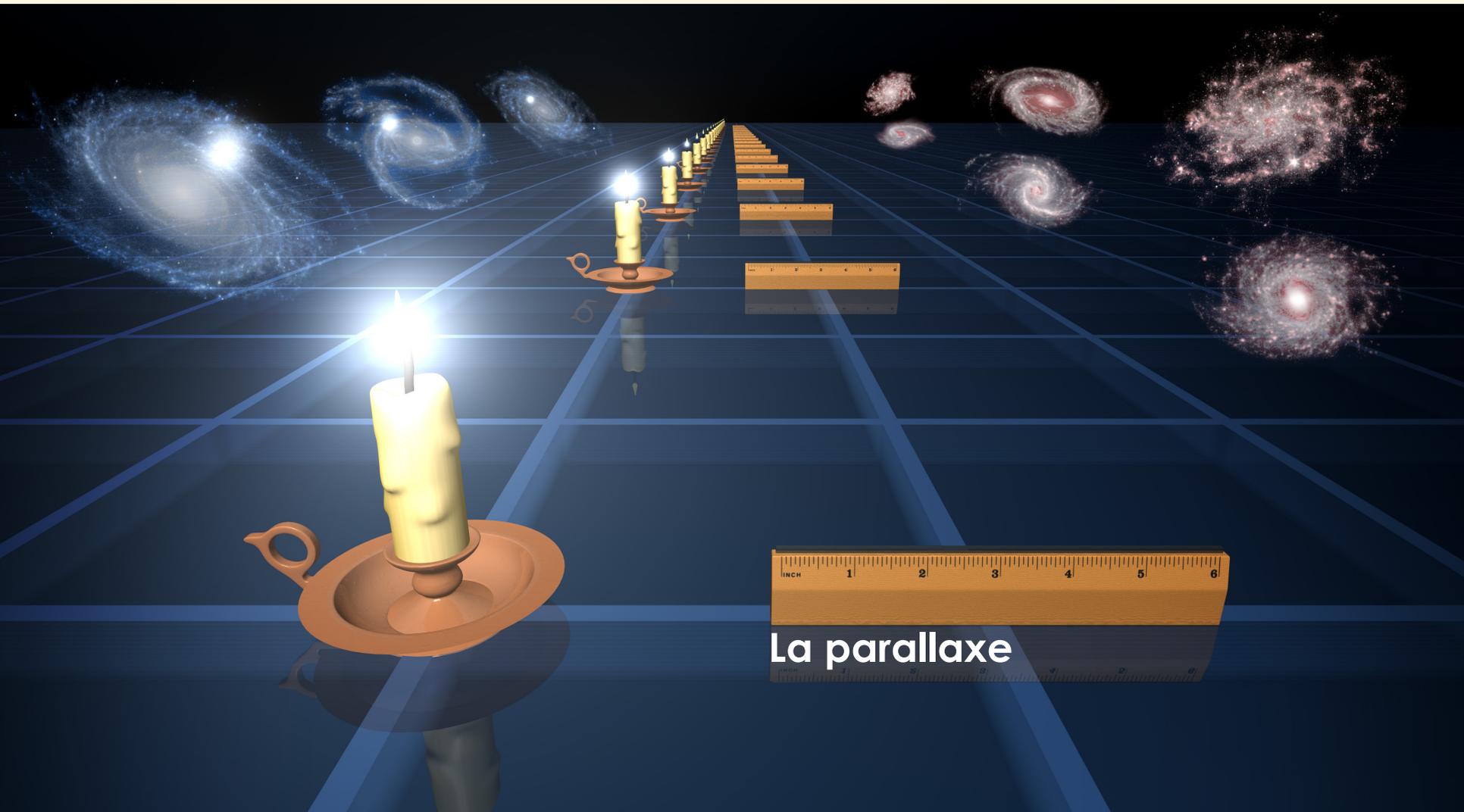
# Parallaxes = 1<sup>er</sup> barreau de l'échelle des distances cosmiques



parallaxe, dérivé du grec parallassein qui signifie changer (allassein) de côté (para), passer d'un côté à l'autre, en l'occurrence d'un côté à l'autre du Soleil.



# L'échelle des distances cosmiques



# Parallaxes = 1<sup>er</sup> barreau de l'échelle des distances cosmiques

A l'époque de Copernic, astronomie issue de l'Almageste de Claude Ptolémée

Rayon de l'univers = distance de la sphère des étoiles fixes  
= 10 000 rayons terrestres

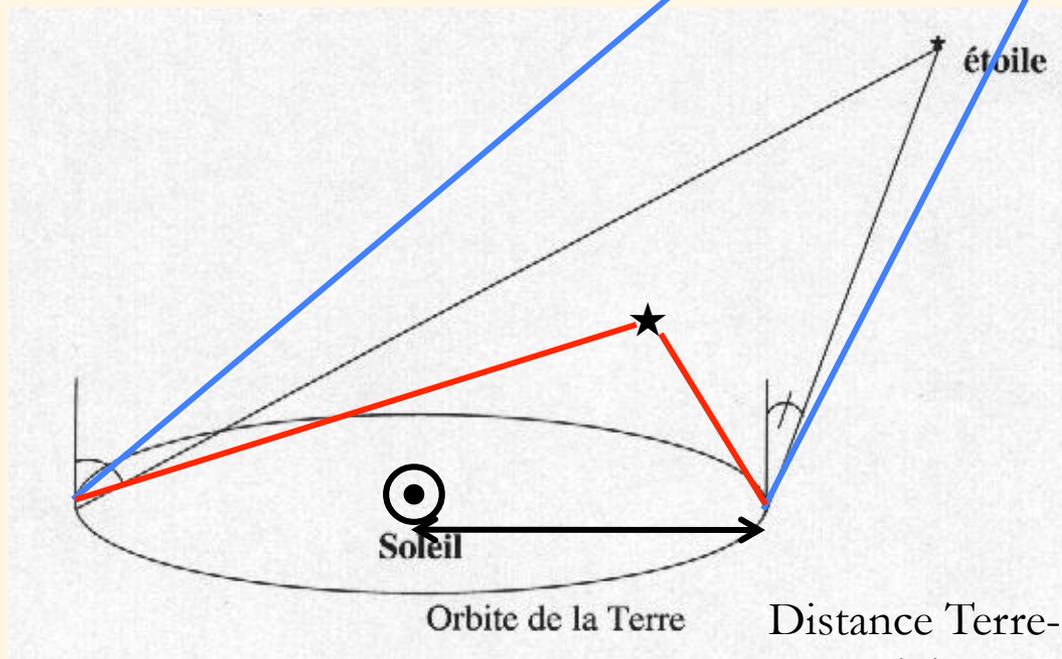
→ parallaxe attendu pour les étoiles = 13,6 degrés = 27 x diamètre Soleil, Lune !  
→ visible à l'oeil nu !

Accepter le passage du géocentrisme à l'héliocentrisme impliquait donc un premier Big Bang puisque cela impliquait de repousser la distance des étoiles.

Centre du monde observable	Taille du monde observable (diamètre)	Taille (km)
Le centre du village « lococentrisme »	Le village et sa proche banlieue (préhistoire)	10-100 km
La Terre au centre du monde, « géocentrisme »	20 000 rayons terrestres (Ptolémée, II <sup>ème</sup> siècle)	10 <sup>8</sup> km
Le Soleil au centre du monde, « héliocentrisme »	400 000 rayons terrestres (Copernic, 1543)	10 <sup>10</sup> km

# La méthode des parallaxes

La première mesure de distance d'une étoile:  
61 Cygni en 1838 dans la constellation du Cygne  
Par Friedrich Bessel (1784 – 1846) alors qu'il mesure  
les positions et mouvements de 50 000 étoiles !



Distance Terre-Soleil = 150 millions de km  
= 1 unité astronomique

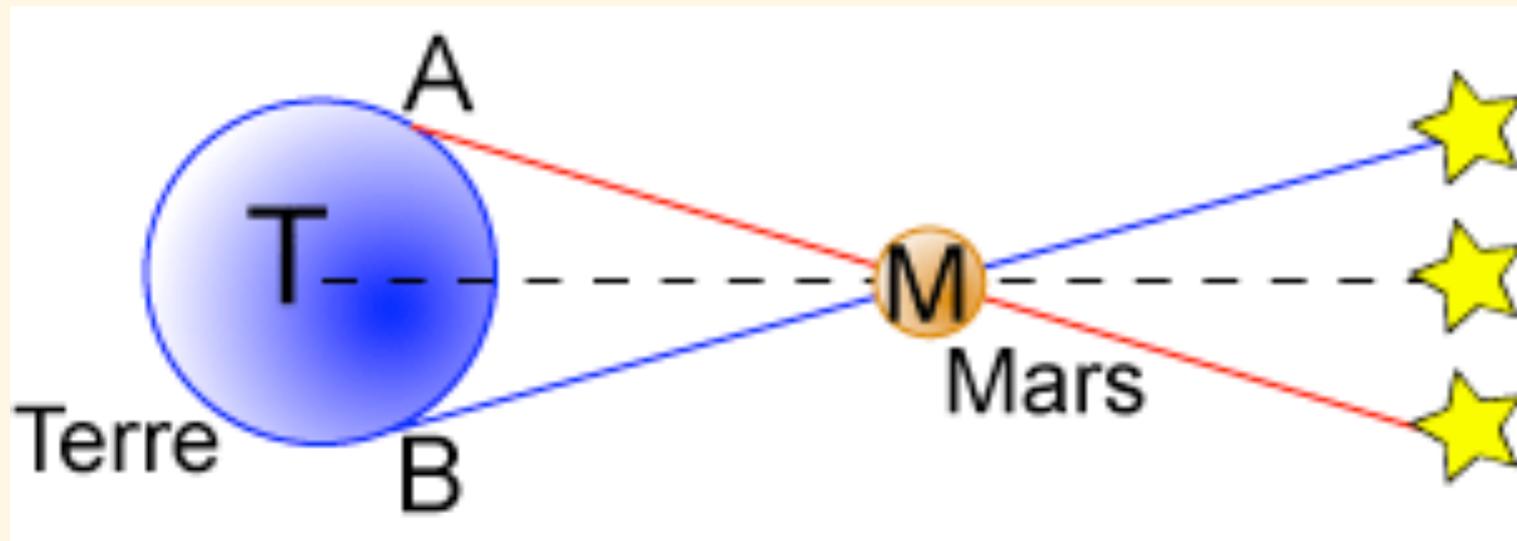


# La distance de Mars par la méthode de la parallaxe horizontale

En 1672, Picard, Cassini et Richer observèrent Mars depuis deux sites (Paris et Cayenne) au moment d'une opposition de Mars, quand Mars était très proche de la Terre.

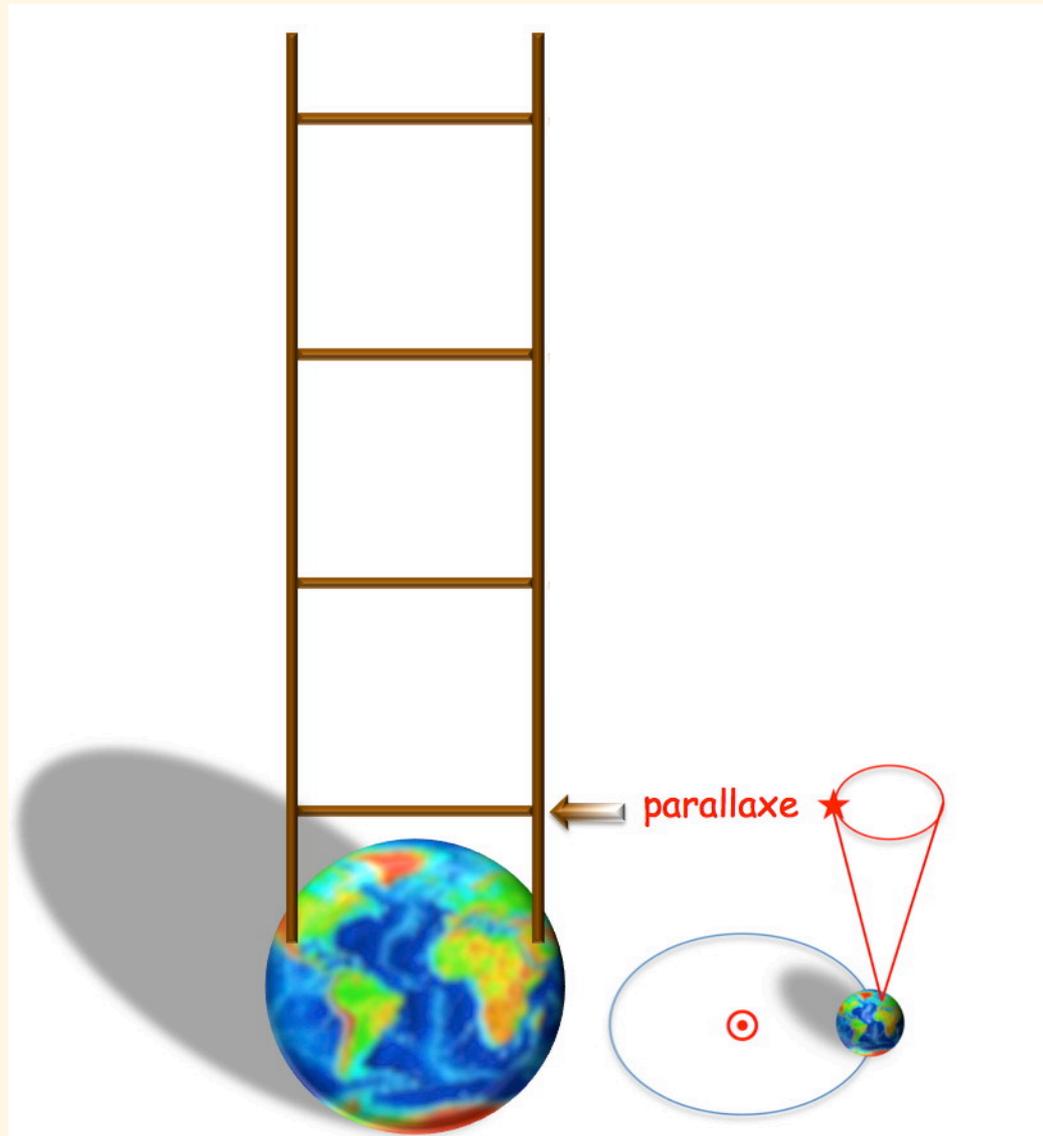
Le décalage de la direction de Mars depuis ces deux sites donne l'angle sous lequel on verrait la distance Paris Cayenne depuis Mars.

Ils mesurèrent la parallaxe horizontale de Mars de  $24'' = \text{Rayon de la Terre} / \text{dist. Terre - Mars}$   
 $\Rightarrow \text{Distance Terre - Mars} = 55 \text{ millions de km}$  (rayon de la Terre = 6400 km)



La distance Terre – Soleil a ensuite été calculée à partir de la distance Terre – Mars : on a utilisé les lois de Képler qui relient les orbites des planètes autour du Soleil

# Échelle des distances cosmiques



## Henrietta Leavitt : article de 1912 présentant la loi des Céphéides

Automne 1904 : Leavitt reçut une photographie de la « nébuleuse » du Petit Nuage de Magellan. Brillance des étoiles sur plaques photographiques du télescope de 60 cm de diamètre de l'université de Harvard installé à Arequipa au Pérou.

Elle récupéra dans ses archives une image de la même région du ciel qu'elle avait reçue au printemps pour comparer les qualités des deux photographies. Les étoiles n'avaient pas bougé, mais 57 étoiles avaient changé, elles étaient plus brillantes sur l'une des photographies que sur l'autre et cela dépendait de l'étoile. En 1904, l'ensemble de la communauté astronomique avait déjà noté l'existence d'étoiles dont la puissance lumineuse avait varié au cours du temps, mais pas plus de 23 cas avaient été répertoriés sur tout le ciel. Avec une seule image du ciel, Leavitt se retrouvait détentrice du record d'étoiles variables en multipliant par plus d'un facteur deux la liste existante.

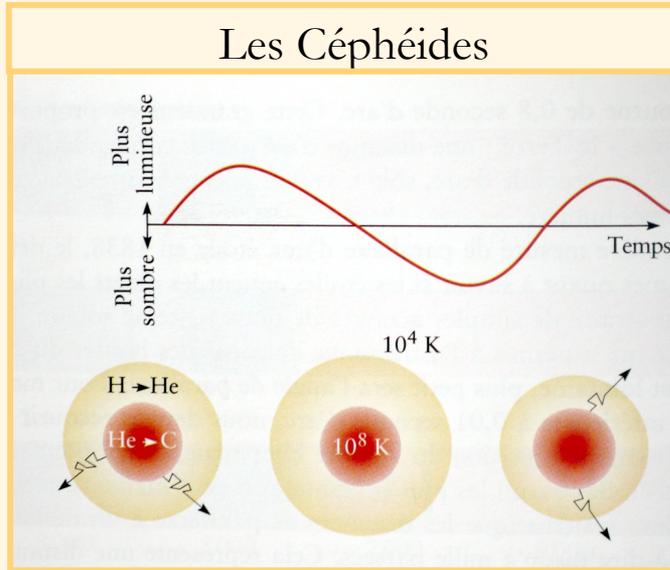
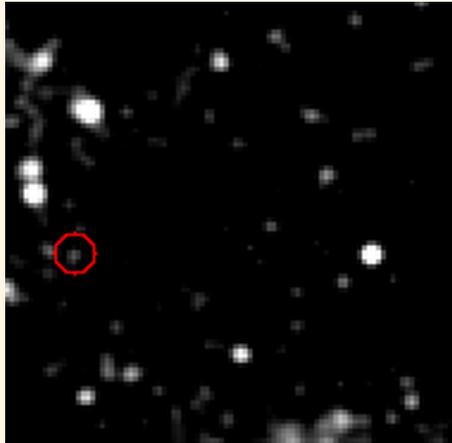
Après avoir récupéré d'autres images de la même région puis demandé que l'on en réalise de nouvelles, Leavitt avait accumulé pas moins de 969 étoiles variables, toutes dans la même région du ciel !

Puis l'observation du Grand Nuage de Magellan conduisit à la découverte de 808 autres étoiles variables.

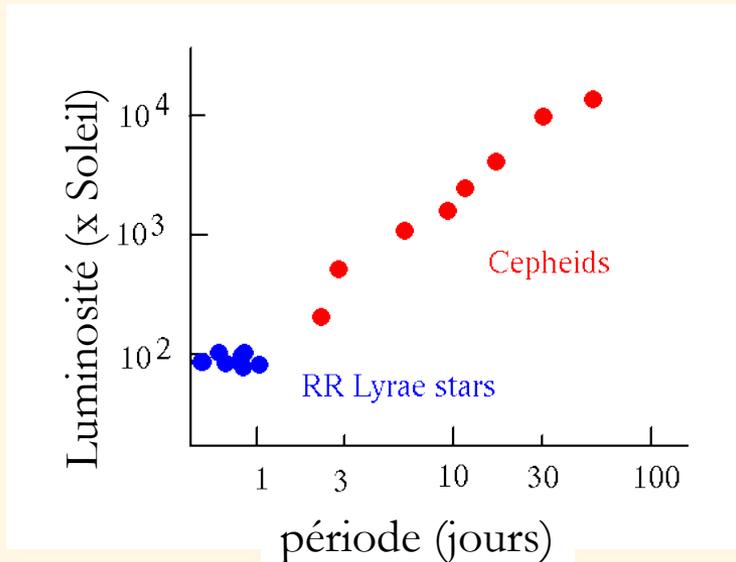
Article publié en 1908 : liste de 1777 étoiles variables.

L'astronome Hollandais John Goodricke avait déjà remarqué en 1784 que la lumière d'une étoile située dans la constellation de Céphée oscillait en passant par un maximum de brillance avec une période régulière de cinq jours. Depuis, toutes les étoiles variables furent appelées des céphéides, car elles rappelaient l'étoile de Céphée.

# Les Céphéides



Henrietta Swan Leavitt (1912)



Les céphéides de Leavitt pulsaient d'autant plus lentement qu'elles étaient brillantes !

En n'observant ses étoiles que dans une même nébuleuse, le Petit Nuage de Magellan, Leavitt s'était assurée qu'elles soient toutes à la même distance de nous. En d'autres termes, les plus brillantes n'étaient pas plus proches mais intrinsèquement plus lumineuses que les autres.

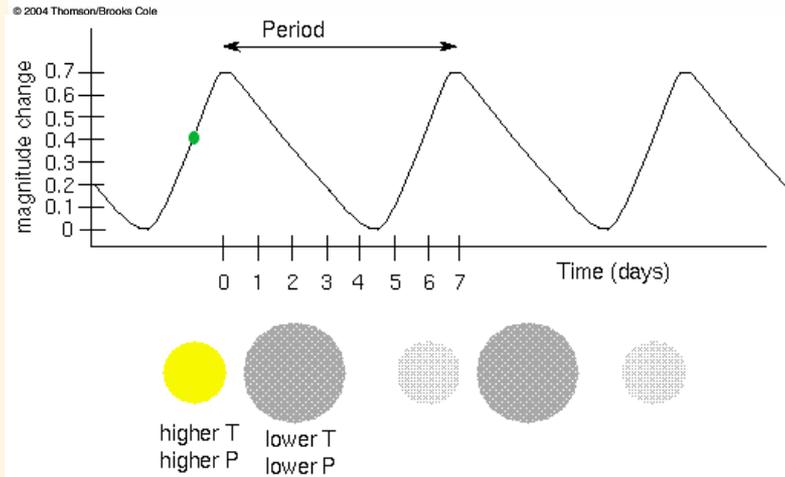
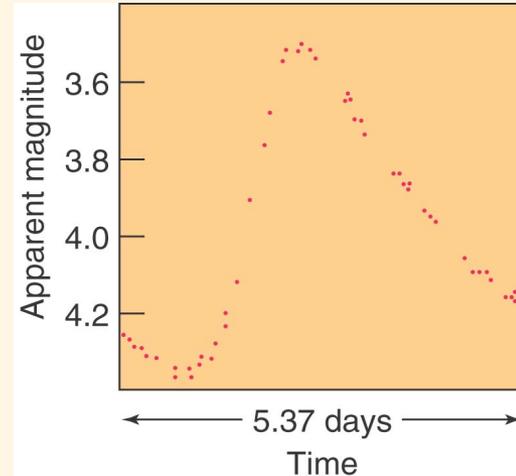
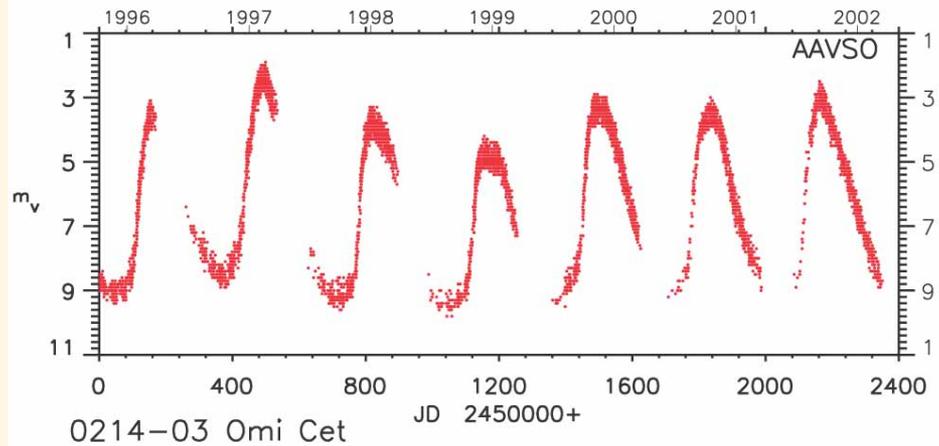
1000 Lsol : pulsation régulière de 5 jours ; 5000 Lsol : période de 10 jours.

Les céphéides sont si lumineuses que l'on peut les voir même à très grande distance.

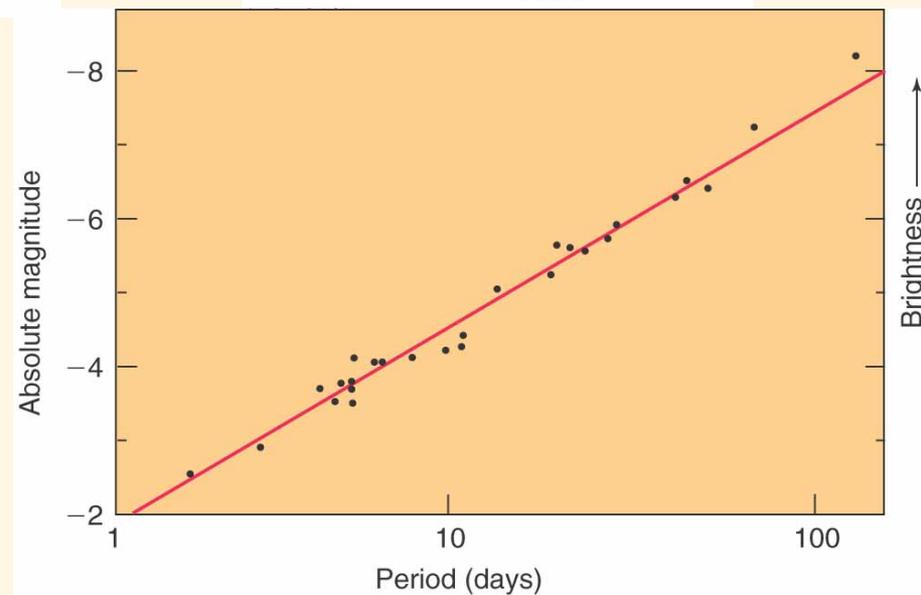
Distance du LMC mesurée par Harlow Shapley.

# Les étoiles variables (Céphéides ( $M > 5 M_{\odot}$ , $< 0.1$ Gyr), RR Lyrae ( $M \approx 1 M_{\odot}$ ))

La magnitude apparente de certaines étoiles pulse du fait de mouvements internes responsables d'une variation de leur rayon et de leur température et donc de leur flux. Leur période de pulsation est proportionnelle à leur luminosité => distance



Cepheid variables: outward pressure (P) and inward gravity compression are out of sync, so star changes size and temperature: it **pulsates**.  
RR-Lyrae variables are smaller and have pulsation periods of less than 24 hours. Also, their light curve looks different from the Cepheid light curve.



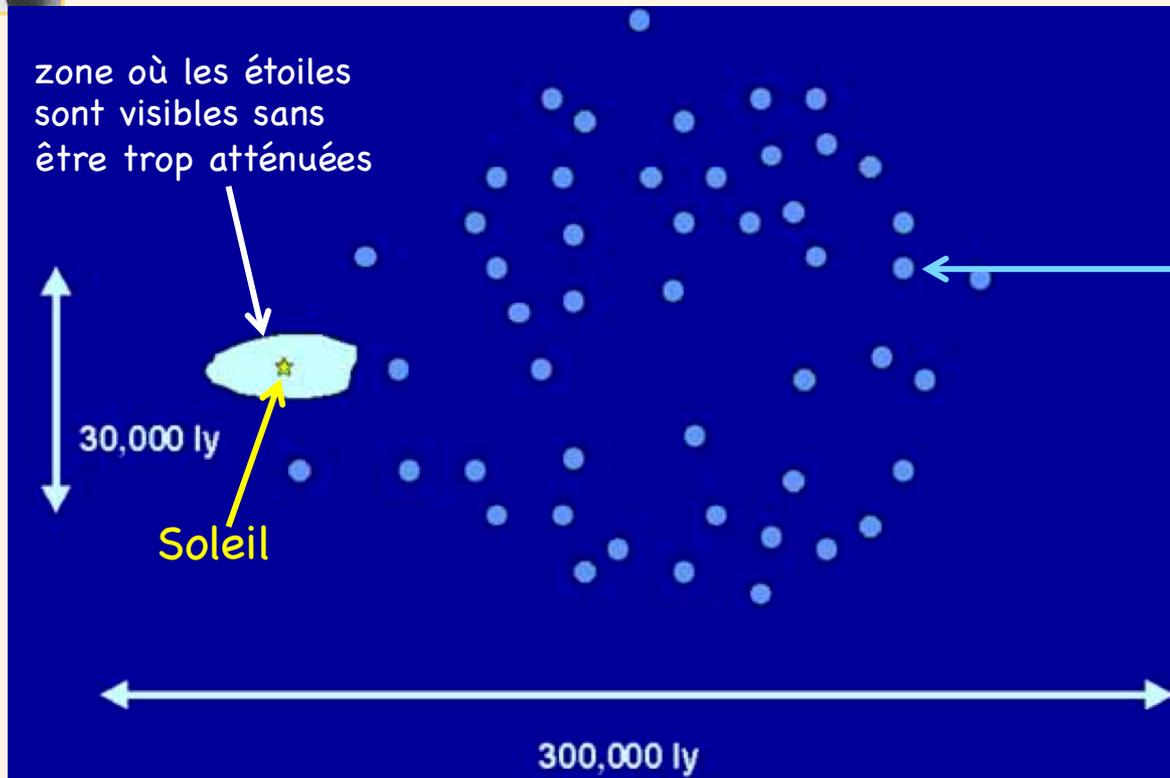
© 2004 Thomson/Brooks Cole

# Harlow Shapley (1918)

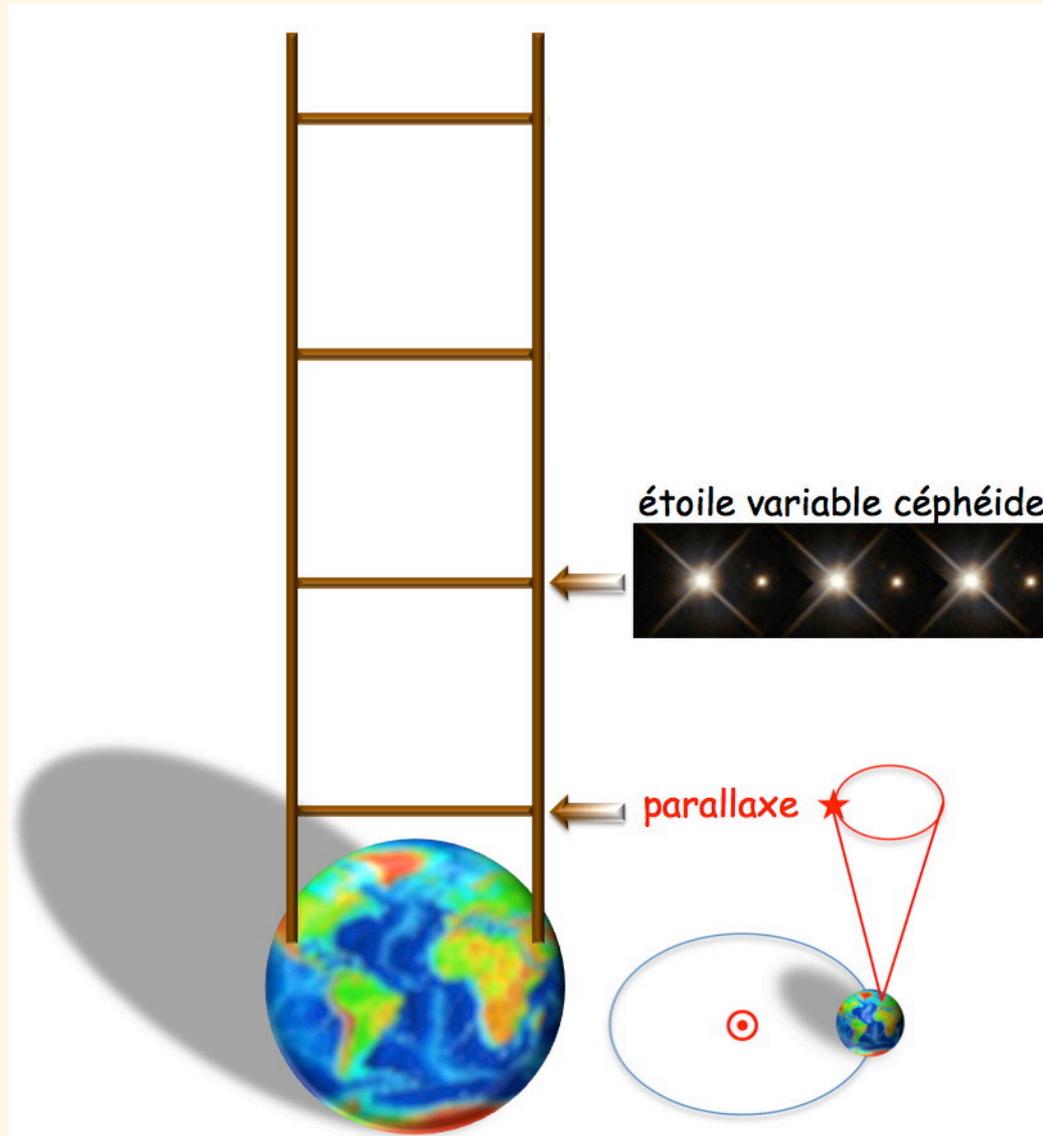


Harlow Shapley calibre la distance des céphéides  
(en étudiant leurs mouvements propres)  
puis il utilise la présence de céphéides dans les amas globulaires pour  
en mesurer la distance.

Il en déduit la taille de la Voie lactée : 300 000 années-lumière



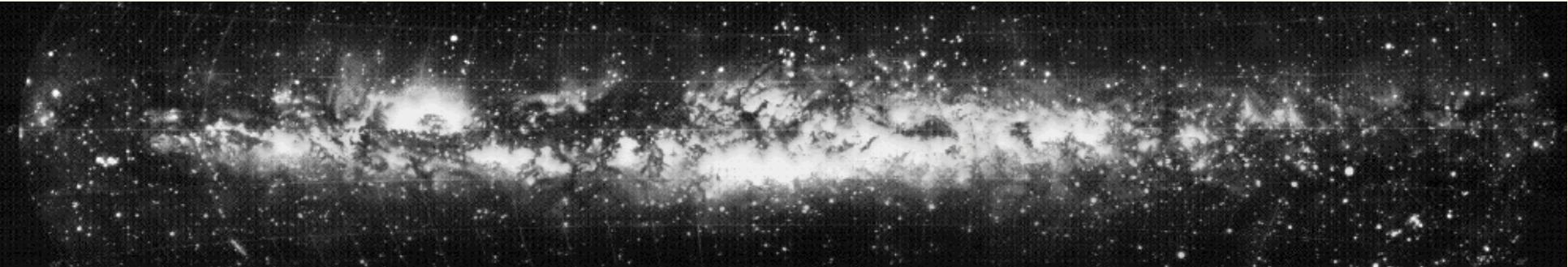
# Échelle des distances cosmiques



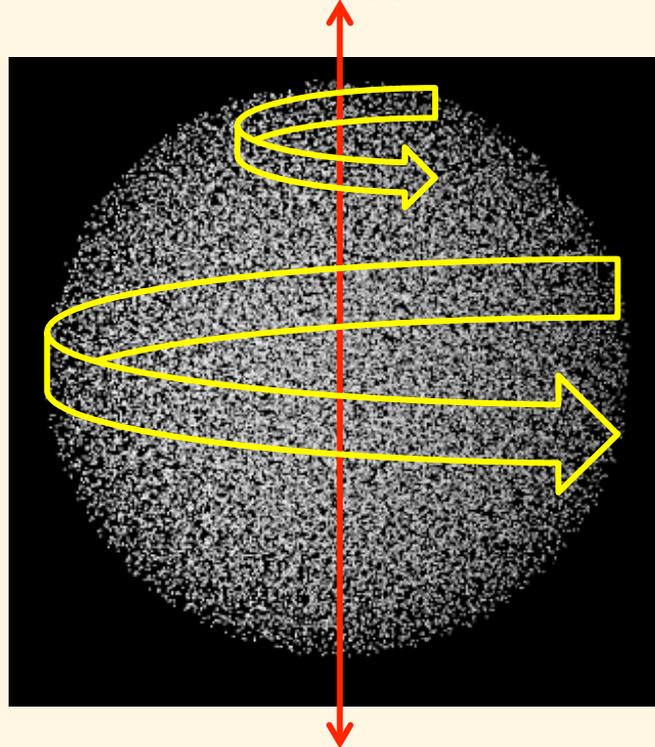
# Pré-histoire des galaxies

- **Étymologie:** *galaxie* de *gala* = lait en grec, *Via Lacta* pour les Romains.
- **Mythologie:** quelques gouttes de lait qu'Hercule fit jaillir en mordant le sein de Junon. Ou encore: le sillage enflammé laissé par Phaéton dans sa course désordonnée à travers le ciel sur le char du Soleil. Selon Ovide: le *chemin des Dieux*, la *voie de l'Immortalité*, qui conduisait les héros au palais de Jupiter. Les Arabes lui donnaient le nom de fleuve céleste.
- **Nature:** Aristote (384-322 av JC) regardait la V.L. comme un météore.
- Démocrite (460-370 av JC): Voie lactée = amas d'étoiles trop petites et trop pressées pour pouvoir être discernées.
- Confirmation vingt siècles plus tard, en 1610, par Galilée (1564-1642) et sa lunette.

Kant (1724-1804): « Histoire générale de la nature et théorie des cieux »



gravité (Newton 1687) + rotation  $\Rightarrow$  aplatissement disque  $\Rightarrow$  plan galactique



très grande échelle  
 $\Rightarrow$  lente période de rotation  
 $\Rightarrow$  mouvements imperceptibles  
Nébuleuses = "univers-îles"

# Historique sur la découverte des galaxies

- 1845: Lord Rosse (William Parsons) découvre l'existence de **deux populations** de nébuleuses grâce à son télescope de 1.80m:
  - les unes avec une distribution de lumière **régulière et elliptique**
  - les autres moins symétriques avec une **structure en spirale**.



M51 (les Chiens de Chasse)  
vue par Lord Rosse

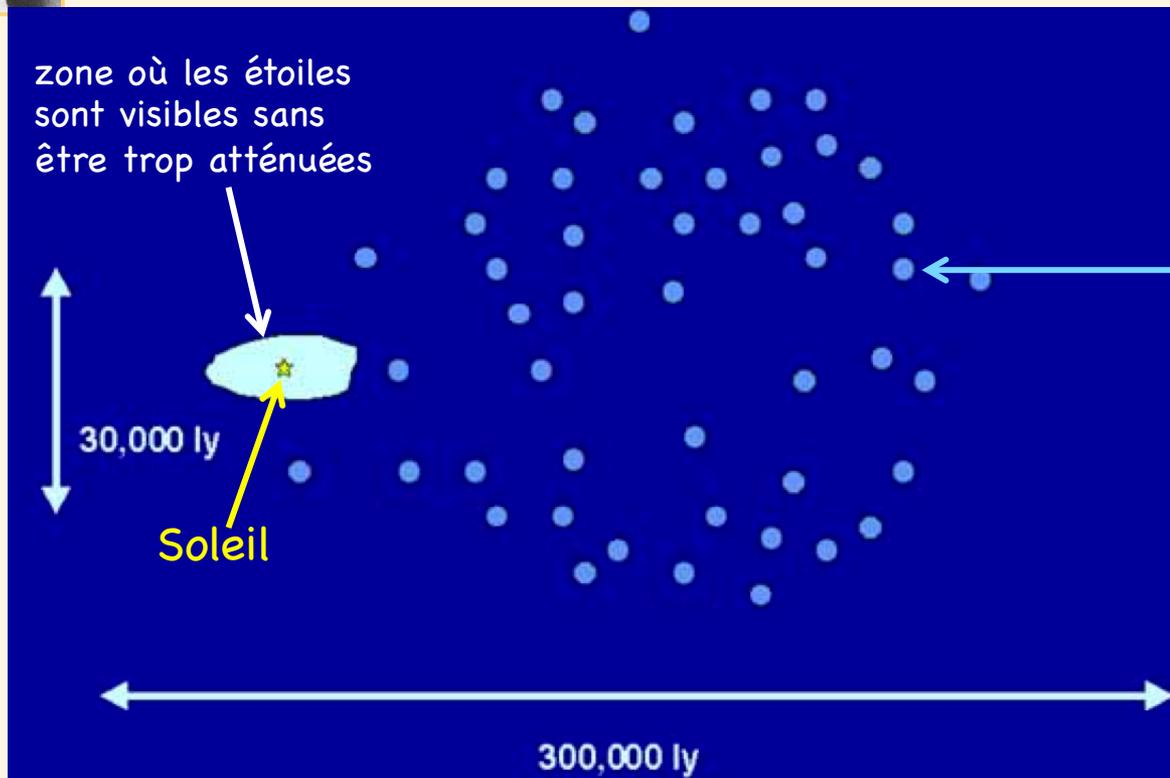
- Il a résolu l'intérieur des nébuleuses spiralées et découvert qu'elles étaient **constituées de sources ponctuelles**, ce qui renforçait l'hypothèse de Kant des univers-îles.
- A la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, l'utilisation de **plaques photographiques** a révolutionné l'astronomie: on pouvait effectuer de longues poses et découvrir des objets invisibles à l'œil nu. On s'est alors attaqué à déterminer la forme de la Voie Lactée.

# Harlow Shapley (1918)



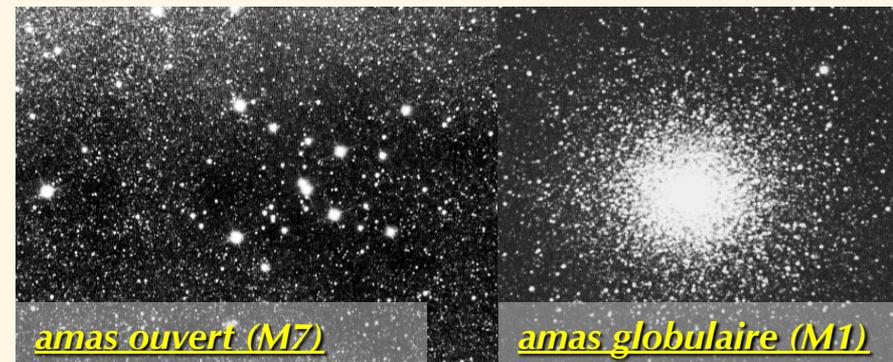
Harlow Shapley calibre la distance des céphéides  
(en étudiant leurs mouvements propres)  
puis il utilise la présence de céphéides dans les amas globulaires pour  
en mesurer la distance.

Il en déduit la taille de la Voie lactée : 300 000 années-lumière



# Les amas stellaires "ouverts" et les amas "globulaires"

- Les **amas ouverts**, utilisés par Trumpler, sont des associations de quelques centaines d'étoiles proches du plan de la Voie Lactée.
- **Harlow Shapley (1918)** utilise les **amas globulaires**. L'avantage est que ces systèmes sphériques (originellement classés comme des nébuleuses, constitués de 10,000 à 1 million d'étoiles) sont distribués sur tout le ciel, et non sur une bande, avec une **sur-densité dans la direction de la constellation du Sagittaire**, là où la Voie Lactée est la plus brillante. Shapley utilise deux techniques pour mesurer la distance des amas globulaires:
  - (1) leur taille et luminosité supposées universelles
  - (2) les étoiles variables (céphéides) dont la relation entre variabilité et luminosité est connue, mise en évidence par Henrietta Leavitt
- L'utilisation d'étoiles variables de luminosité intrinsèque connue et de la taille apparente des amas globulaires (en supposant qu'ils étaient tous de taille identique) a permis à Shapley de déduire que nous étions situés à **15 kpc du centre de la V.L.**, qui elle-même avait une taille de **100 kpc de diamètre**. Il en déduisit que l'idée des univers-îles de Emmanuel Kant était fausse et qu'il n'y avait qu'une seule galaxie dans l'univers, la V.L. étant déjà bien assez grande.



# M10 (NGC 6254): un amas globulaire



- Taille apparente= 2/3 lune= 20'

- distance= 14 300 a.l.

- diamètre= 83 a.l.

[ 1 année-lumière=  $9.5 \times 10^{15}$  m  $\sim 10^{16}$  m ]

- Messier: "nébuleuse sans étoiles"

- Herschel le résoud en étoiles

Les amas globulaires= concentrations de 10 000 à 1 million d'étoiles gravitationnellement liées.

La Voie Lactée en possède ~200

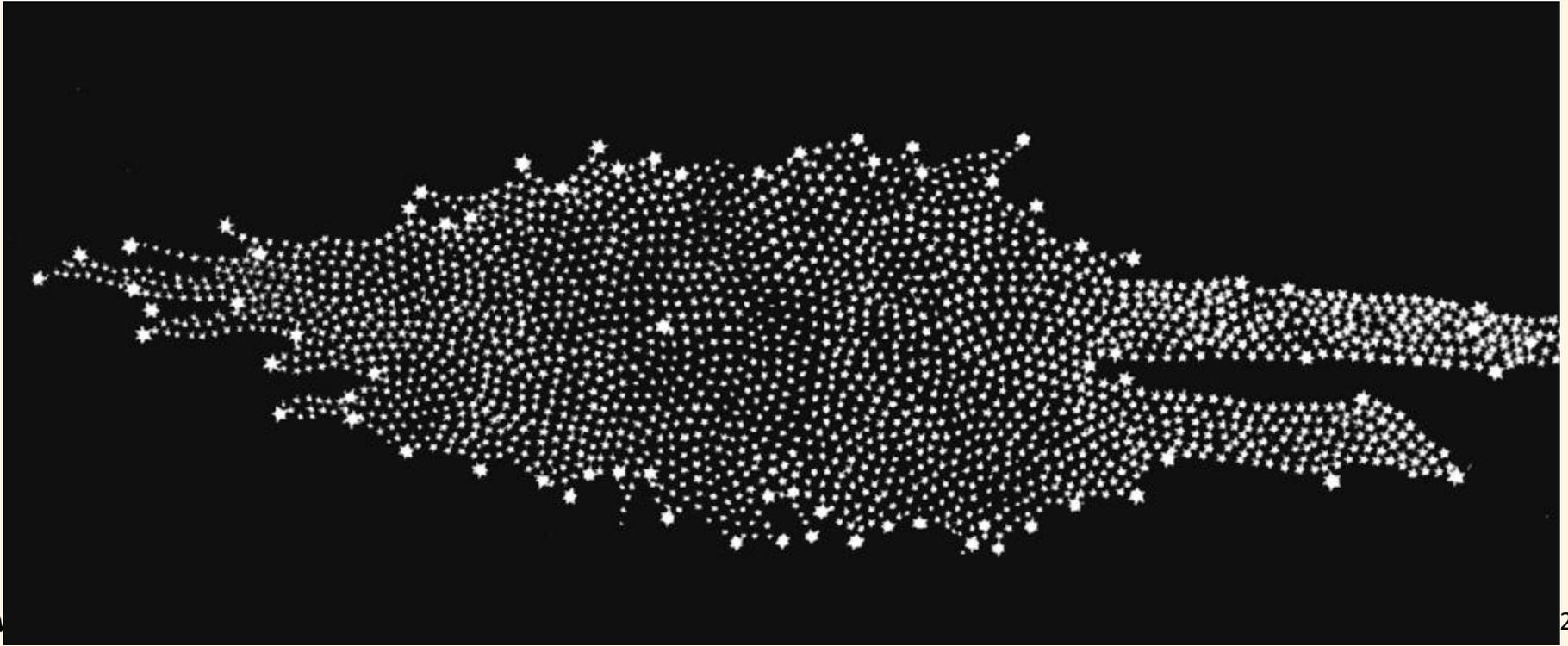
Les étoiles des amas globulaires sont vieilles et peu riches en métaux (tous les atomes plus lourds que l'hélium)= étoiles de population II

Leur âge est si grand qu'il pose parfois des problèmes p.r. âge univers

Peuplent le halo sphérique qui englobe le disque de la Voie Lactée

# Héliocentrisme galactique

- En supposant que toutes les étoiles rayonnent la même puissance, Herschel (1785) avait déduit que la Voie Lactée était de forme oblongue et dont nous occupions le centre.
- Kapteyn (1922) a coordonné une équipe internationale d'astronomes. A l'aide de plaques photos, il a mesuré les mouvements propres des étoiles et leurs mouvements radiaux grâce au décalage Doppler. Il en a déduit une distribution 3D où à nouveau nous occupions presque le centre (à 650 pc du centre), là où se trouvaient 10 % des étoiles= l'univers de Kapteyn, qui pose le problème anthropique de l'homme au centre de l'univers.
- Une alternative s'est imposée à Kapteyn: la présence d'un milieu interstellaire absorbant !



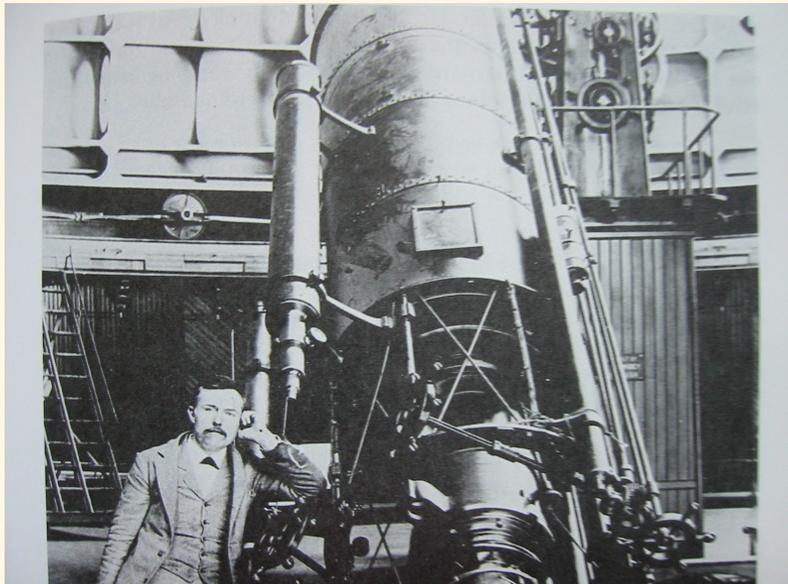
<b>Centre du monde observable</b>	<b>Taille du monde observable</b>	<b>Taille (km)</b>
Le centre du village « lococentrisme »	Le village et sa proche banlieue (préhistoire)	10-100 km
La Terre au centre du monde, « géocentrisme »	20 000 rayons terrestres (Ptolémée, II <sup>ème</sup> siècle)	$10^8$ km
Le Soleil au centre du monde, « héliocentrisme »	400 000 rayons terrestres (Copernic, 1543)	$10^{10}$ km
Le Soleil au centre de la Galaxie, « héliocentrisme galactique »	1000 fois la distance de Sirius (i.e. 8 600 années-lumière) (Herschel, 1785)	$10^{17}$ km

## Le rôle de l'extinction par la poussière interstellaire

- L'absorption de la lumière des étoiles par un ***milieu absorbant*** nous donnerait l'impression de nous situer au centre de la Voie Lactée. Certaines zones sombres de la Voie Lactée indiquaient déjà cet effet, s'ils étaient dûs à des vides d'étoiles, ces vides auraient dû s'étendre en de longs couloirs pointant dans notre direction, pour expliquer que l'on ne voit pas d'étoile derrière...

“Serpent” ou nébuleuse “S” (Barnard 72), Edwin Barnard ApJ (1919):  
“On the Dark Markings of the Sky with a Catalog of 182 such Objects”

« Je pense que certaines d'entre elles vont bientôt autant attirer l'attention que les nébuleuses » éditeur



Ed Barnard au télescope de Lick (90 cm) en 1895

« Personne ne peut supposer un instant que cette trace soit autre chose qu'un vide entre les étoiles »



© 1998 Jerry Lodriguss

ON THE DARK MARKINGS OF THE SKY  
WITH A CATALOGUE OF 182 SUCH OBJECTS

By E. E. BARNARD

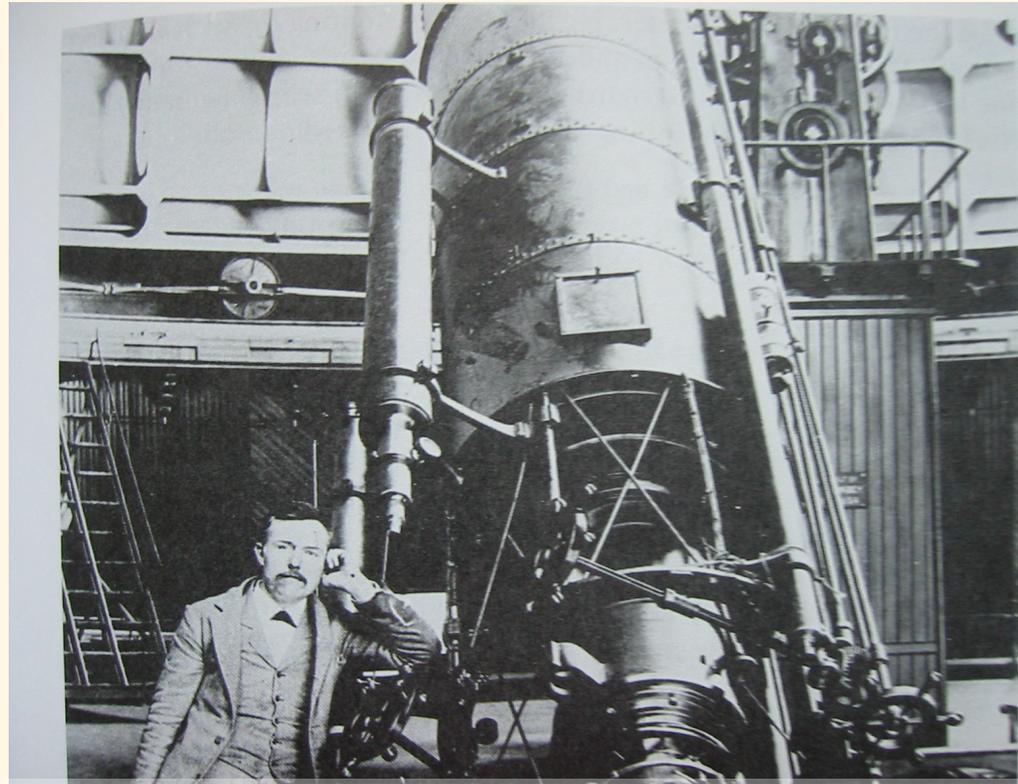
THE  
ASTROPHYSICAL JOURNAL

JANUARY 1919

Il serait imprudent de supposer que toutes les régions noires que l'on trouve sur les photographies du ciel sont dues à la présence de masses opaques situées entre nous et les étoiles. Dans un nombre considérable de cas, aucune autre explication n'est possible, mais **certaines de ces régions sont assurément uniquement des vides.**

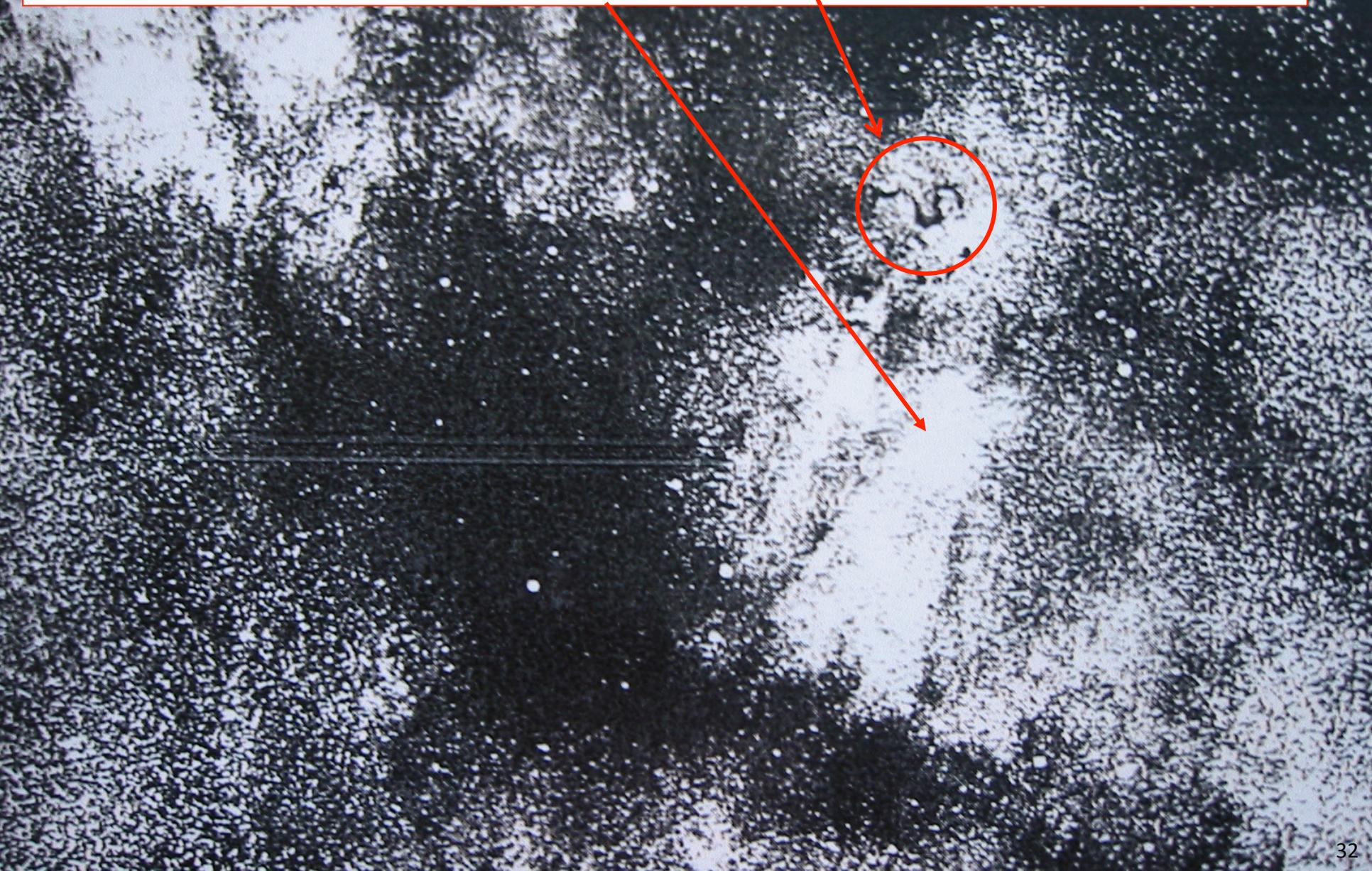


David Elbaz - ET12 master M2 2016



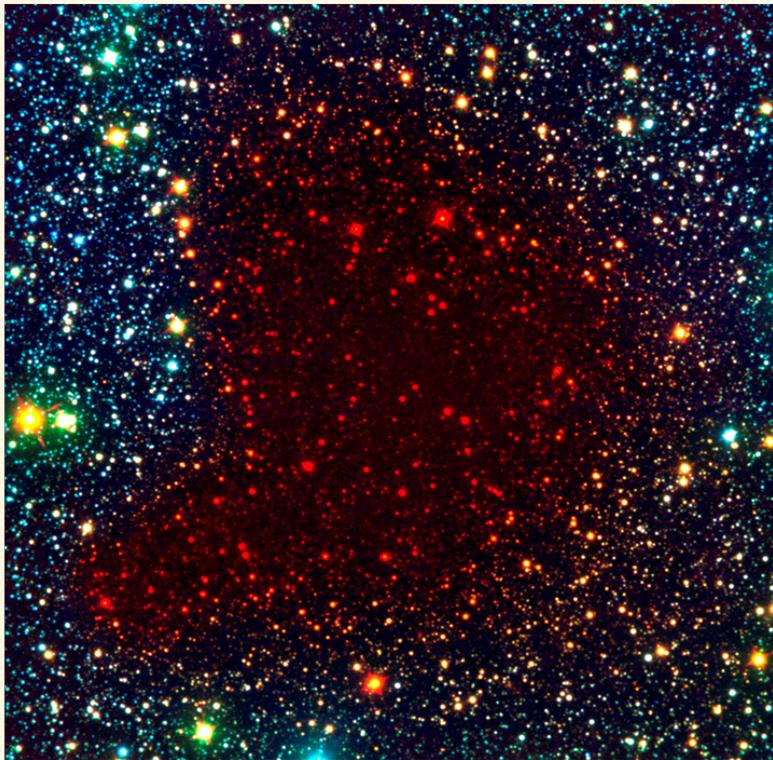
Ed Barnard, télescope de Lick (90cm) 1892

**Photographie d'une « nébuleuse noire » en forme de S  
à l'est de l'étoile  $\theta$  Ophiuchi**





David Elbaz - ET12 master M2 2016



David Elbaz - ET12 master M2 2016

## Le rôle de l'extinction par la poussière interstellaire

- L'absorption de la lumière des étoiles par un ***milieu absorbant*** nous donnerait l'impression de nous situer au centre de la Voie Lactée. Certaines zones sombres de la Voie Lactée indiquaient déjà cet effet, s'ils étaient dûs à des vides d'étoiles, ces vides auraient dû s'étendre en de longs couloirs pointant dans notre direction, pour expliquer que l'on ne voit pas d'étoile derrière...
- La ***diffusion de Rayleigh*** par un gaz interstellaire étant plus efficace pour le bleu que le rouge, Kapteyn a utilisé le rougissement des étoiles pour mesurer un effet qui s'est révélé être ***négligeable***...
- En réalité, nous savons aujourd'hui que la lumière des étoiles est affectée par l'absorption par la ***poussière interstellaire*** plus que par la diffusion due au gaz. La dépendance en longueur d'onde de l'absorption par la poussière étant plus faible que celle de la diffusion de Rayleigh, le rougissement observé des étoiles en fonction de leur distance implique une bien plus grande quantité d'obscuration et donc des distances bien plus grandes des étoiles rougies... Mais il faudra attendre 1930 pour que Trumpler le démontre par l'étude d'amas stellaires ouverts dont il a supposé qu'ils avaient tous la même taille pour en mesurer les distances.



# Le Grand Débat: les nébuleuses sont-elles des univers-îles ?

- Le débat (Avr.1920) sur cette question avec
- **Harlow Shapley**: univers observable limité à la Voie lactées
- **Heber Curtis** : nébuleuses spirales = autres galaxies, extérieures à la Voie lactée
- Curtis utilisait la même technique que **Harlow Shapley** mais appliquée aux nébuleuses spirales: on trouve des nébuleuses spirales comme Andromède (M31), qui s'étale sur plus de  $2^\circ$  sur le ciel, et d'autres qui ne font que quelques secondes d'arc. Si les objets avaient des tailles et des luminosités comparables, cela impliquait que leurs distances s'étaient sur plus de 1000 fois celle de M31, i.e. bien plus que la taille de la V.L.
- Curtis avait calculé une distance de 100 kpc pour M31 à l'aide de novae et en déduisit une taille de 3 kpc, similaire à celle estimée pour la V.L. par Kapteyn, ce qui impliquait que M31 était une galaxie similaire à la V.L.
- 2 erreurs qui s'annulent chez Curtis: Voie Lactée 10x trop petite + "novae" 10x trop loin
  - (i) Il ne s'agissait pas de novae mais de supernovae dans M31, 100 fois plus lumineuses. La distance de M31 n'est pas de 100 kpc mais de 773 kpc ( $2.52 \times 10^6$  a.l., Ribas et al. 2005)
    - **1 supernova rayonne une énergie totale de  $10^{51}$  ergs, i.e.  $10^{44}$  J, et possède une luminosité typique de  $10^{41}$  ergs/s =  $10^8 L_\odot$  pendant une durée limitée.**
    - **une nova rayonne une énergie totale de  $10^{45}$  ergs, i.e.  $10^{38}$  J, et produit pendant**

# Les causes du grand débat et sa résolution

- Shapley de son côté avait remarqué que les étoiles des nébuleuses spirales étaient plus bleues que celles de la V.L. et en déduisit qu'il ne s'agissait pas des mêmes systèmes, mais nous savons aujourd'hui que les étoiles de la V.L. étant vues **dans le plan du disque, elles subissent une plus forte extinction par la poussière.**
- **Les deux camps avaient utilisé au mieux leurs données:**
  - De son côté, Shapley avait proposé la meilleure estimation de la taille de la V.L. et de la position du soleil dans la V.L.
  - Curtis avait raison sur la véritable nature des nébuleuses spirales.
- La confusion qui a régné dans le débat venait de:
  - (i) l'utilisation par Curtis du modèle de Kapteyn pour la V.L.
  - (ii) l'utilisation par Shapley des mesures de vitesses de rotation des étoiles des nébuleuses spirales réalisées par Adriaan van Maanen, qui impliqueraient des vitesses de rotation superluminiques si les nébuleuses avaient été extragalactiques ! Mais ces mesures faites sur des plaques photos des mouvements propres des étoiles des nébuleuses au cours de plusieurs années étaient fausses !...
- On avait constaté que le décalage **Doppler mesuré dans le spectre des nébuleuses était plus grand** que celui des étoiles individuelles, ce qui indiquait qu'elles étaient plus distantes que celles-ci. Mais le fait que toutes les nébuleuses aient un décalage vers le rouge comme si elles fuyaient la V.L. restait incompréhensible... Il faudra attendre Hubble et la découverte du Big Bang pour comprendre.

<b>Centre du monde observable</b>	<b>Taille du monde observable</b>	<b>Taille (km)</b>
Le centre du village « lococentrisme »	Le village et sa proche banlieue (préhistoire)	10-100 km
La Terre au centre du monde, « géocentrisme »	20 000 rayons terrestres (Ptolémée, II <sup>ème</sup> siècle)	$10^8$ km
Le Soleil au centre du monde, « héliocentrisme »	400 000 rayons terrestres (Copernic, 1543)	$10^{10}$ km
Le Soleil au centre de la Galaxie, « héliocentrisme galactique »	1000 fois la distance de Sirius (i.e. 8 600 années-lumière) (Herschel, 1785)	$10^{17}$ km
Le centre de la Galaxie (Soleil décalé) « galactocentrisme »	100 000 années-lumière (Shapley, 1918)	$10^{18}$ km

# NEBULÆ.

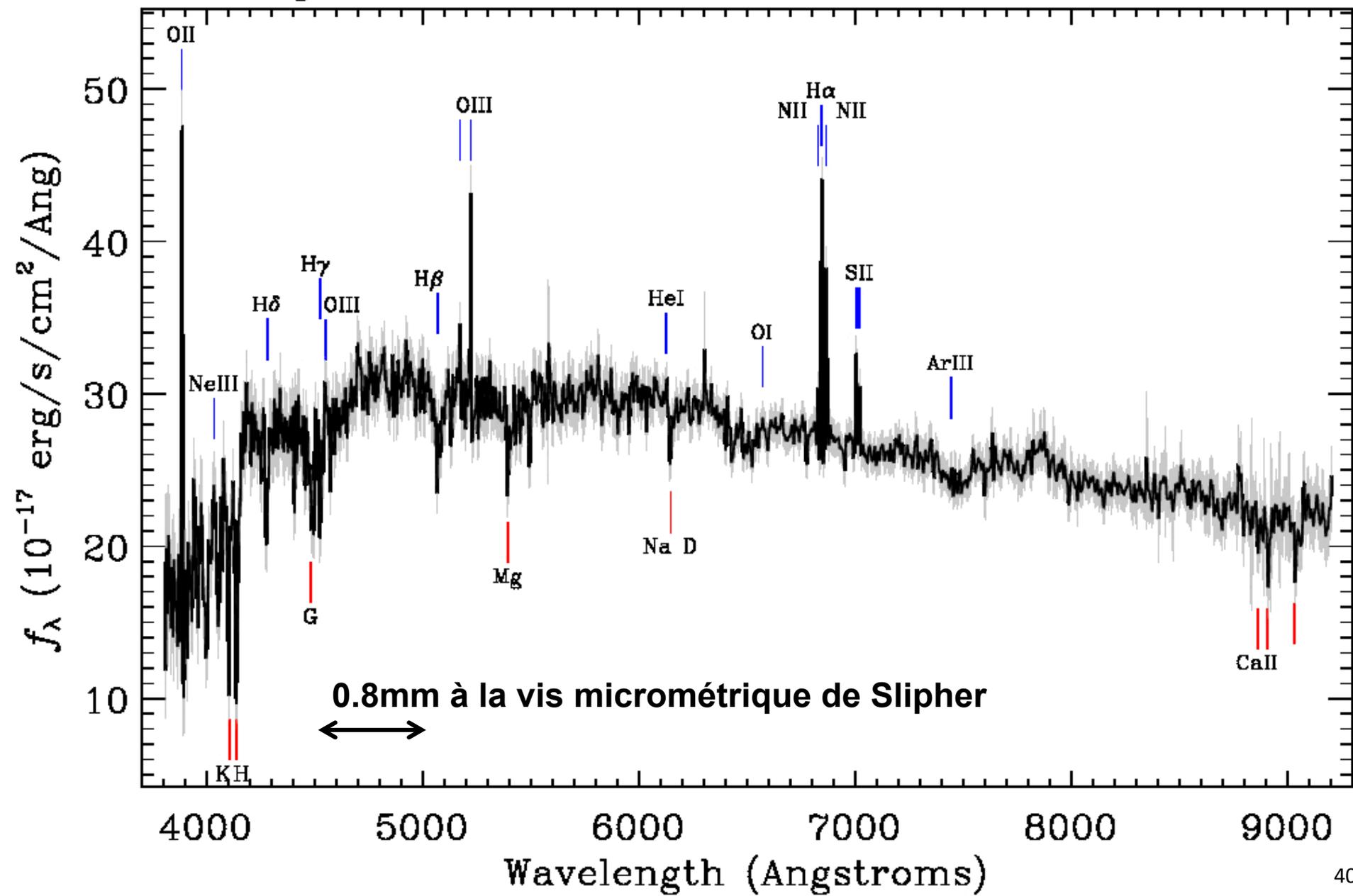
By V. M. SLIPHER, PH.D.

*(Read April 13, 1917.)*

In addition to the planets and comets of our solar system and the countless stars of our stellar system there appear on the sky many cloud-like masses—the nebulæ. These for a long time have been generally regarded as presenting an early stage in the evolution of the stars and of our solar system, and they have been carefully studied and something like 10,000 of them catalogued.

the spectra of the spiral nebulæ. These objects have since been found to be possessed of extraordinary motions and it is the observation of these that will be discussed here.

The arithmetic mean of the velocities is 570 km. and 100 km. is hence scarcely 20 per cent. of the quantity observed. With stars the average velocity is about 20 km. and two observers with dif-



## RADIAL VELOCITIES OF TWENTY-FIVE SPIRAL NEBULÆ.

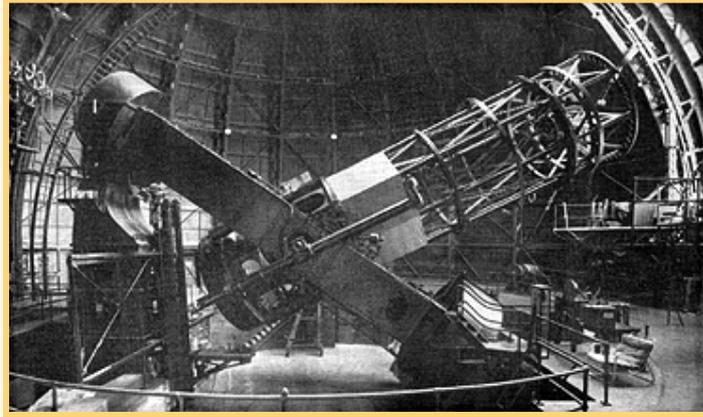
Nebula.	Vel.	Nebula.	Vel.
N.G.C. 221	- 300 km.	N.G.C. 4526	+ 580 km.
224	- 300	4565	+ 1100
598	- 260	4594	+ 1100
1023	+ 300	4649	+ 1090
1068	+ 1100	4736	+ 290
2683	+ 400	4826	+ 150
3031	- 30	5005	+ 900
3115	+ 600	5055	+ 450
3379	+ 780	5194	+ 270
3521	+ 730	5236	+ 500
3623	+ 800	5866	+ 650
3627	+ 650	7331	+ 500
4258	+ 500		

Referring to the table of velocities again: the average velocity 570 km. is about thirty times the average velocity of the stars. And it is so much greater than that known of any other class of celestial bodies as to set the spiral nebulæ aside in a class to themselves. Their distribution over the sky likewise shows them to be unique—they shun the Milky Way and cluster about its poles.

The mean of the velocities with regard to sign is positive, implying the nebulæ are receding with a velocity of nearly 500 km. This might suggest that the spiral nebulæ are scattering but their distribution on the sky is not in accord with this since they are inclined to cluster. A little later a tentative explanation of the preponderance of positive velocities will be suggested.

# Les nébuleuses sont bien des "univers-îles"

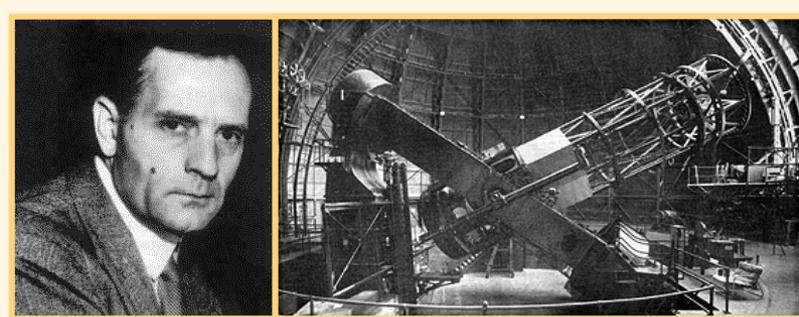
- En 5 ans, **Edwin Hubble** résolut la controverse grâce à l'utilisation du **télescope Hooker de 2.50m de diamètre** à l'observatoire du mont Wilson.



(localisé à 1742 m d'altitude près de Los Angeles; Hooker est le nom du donateur, comme Keck pour les télescopes de 10 m de Hawaii)

*Le diamètre du télescope spatial Hubble est de 2.40m comme celui du Mont Wilson utilisé par Hubble en 1929 ! Celui du Mont Palomar qui détrôna Mont Wilson en 1948 est de 5 m.*

- Les parties externes de deux nébuleuses spirales étaient composées de myriades d'étoiles, qui devaient être localisées à de très grandes distances si elles étaient similaires aux étoiles les plus lumineuses de la V.L.
  - En **1923**, il utilise une technique développée par Henrietta Leavitt pour mesurer les distances. La distance de M31 estimée de cette manière était de 300 kpc, donc supérieure à la taille de la V.L. Une calibration plus fine des Céphéides démontrera plus tard que la distance réelle de M31 est de 667 kpc et plus récemment, avec un système binaire à éclipse 773 kpc ( $2.52 \times 10^6$  a.l., Ribas et al. 2005), mais la conclusion reste inchangée.
- ⇒ *Les nébuleuses spirales sont des galaxies spirales, tandis que la plupart de celles qui ne présentent aucune particularité sont des galaxies elliptiques.*



E. Hubble      Télescope 2.50m Mt Wilson

Edwin Hubble démontre  
l'existence d'autres galaxies



### N.G.C. 6822, A REMOTE STELLAR SYSTEM<sup>1</sup>

By EDWIN HUBBLE

**Astrophysical Journal, 62, 409 (1925)**

*A study of N.G.C. 6822.*—The object is a very faint cluster of stars and nebulae, about 20' × 10', resembling the Magellanic Clouds. Detailed investigations confirm the similarity and show that it extends to many structural features of these systems. Familiar relations such as those connecting periods and luminosities of Cepheids, luminosities of brightest stars involved in diffuse nebulae, and frequencies of the most luminous stars in the systems are consistent when applied to N.G.C. 6822, the first object definitely assigned to a region outside the galactic system.

### A SPIRAL NEBULA AS A STELLAR SYSTEM

MESSIER 33<sup>1</sup>

By EDWIN HUBBLE    **ApJ 63, 236 (1926)**

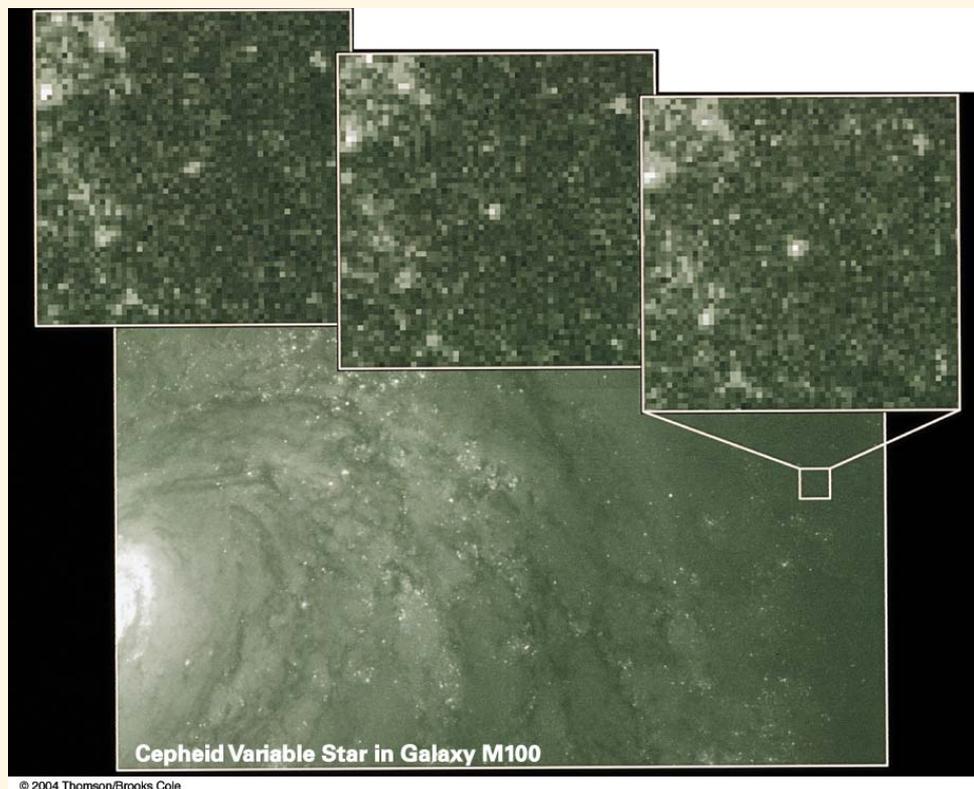


### A SPIRAL NEBULA AS A STELLAR SYSTEM,

MESSIER 31<sup>1</sup>

By EDWIN HUBBLE    **ApJ 69, 103 (1929)**

# Observation d'une céphéide dans la galaxie spirale M100



# THE LAW OF RED-SHIFTS

*George Darwin Lecture\**, delivered by Dr Edwin Hubble on 1953 May 8

## I. THE FIRST PHASE (DISCOVERY)

### A. Radial Velocities

The discovery emerged from a combination of radial velocities measured by Slipher at Flagstaff with distances derived at Mount Wilson. You will recall that the first velocity of a spiral nebula was measured by Slipher in 1912 ( $-300$  km/sec for M 31). I mention the incident because the first step in a new field is the great step. Once it is taken, the way is clear and all may follow. In this case, however, Slipher worked almost alone, and ten years later, when he turned to other problems, he had contributed 42 out of the 46 nebular velocities then available. The list was completely dominated by large positive velocities, ranging up to  $+1800$  km/sec for NGC 584.

Attempts were made, from 1916 onward, to derive the solar motion with respect to the nebulae; but the positive signs, indicating general recession, proved intractable. Then, in 1918, Wirtz attempted to “save the phenomena” by introducing a constant  $K$  term in the equations. The device improved the results somewhat but not enough to render them acceptable. Nevertheless, it did suggest that the next logical step would be to replace the constant  $K$  with  $rK$ , a term which varied with the distances of the individual nebulae. This procedure was suggested by the run of residuals in the earlier solutions but it was also encouraged by the rapidly developing studies of relativistic cosmology.

# A RELATION BETWEEN DISTANCE AND RADIAL VELOCITY AMONG EXTRA-GALACTIC NEBULAE

BY EDWIN HUBBLE

MOUNT WILSON OBSERVATORY, CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON

Communicated January 17, 1929

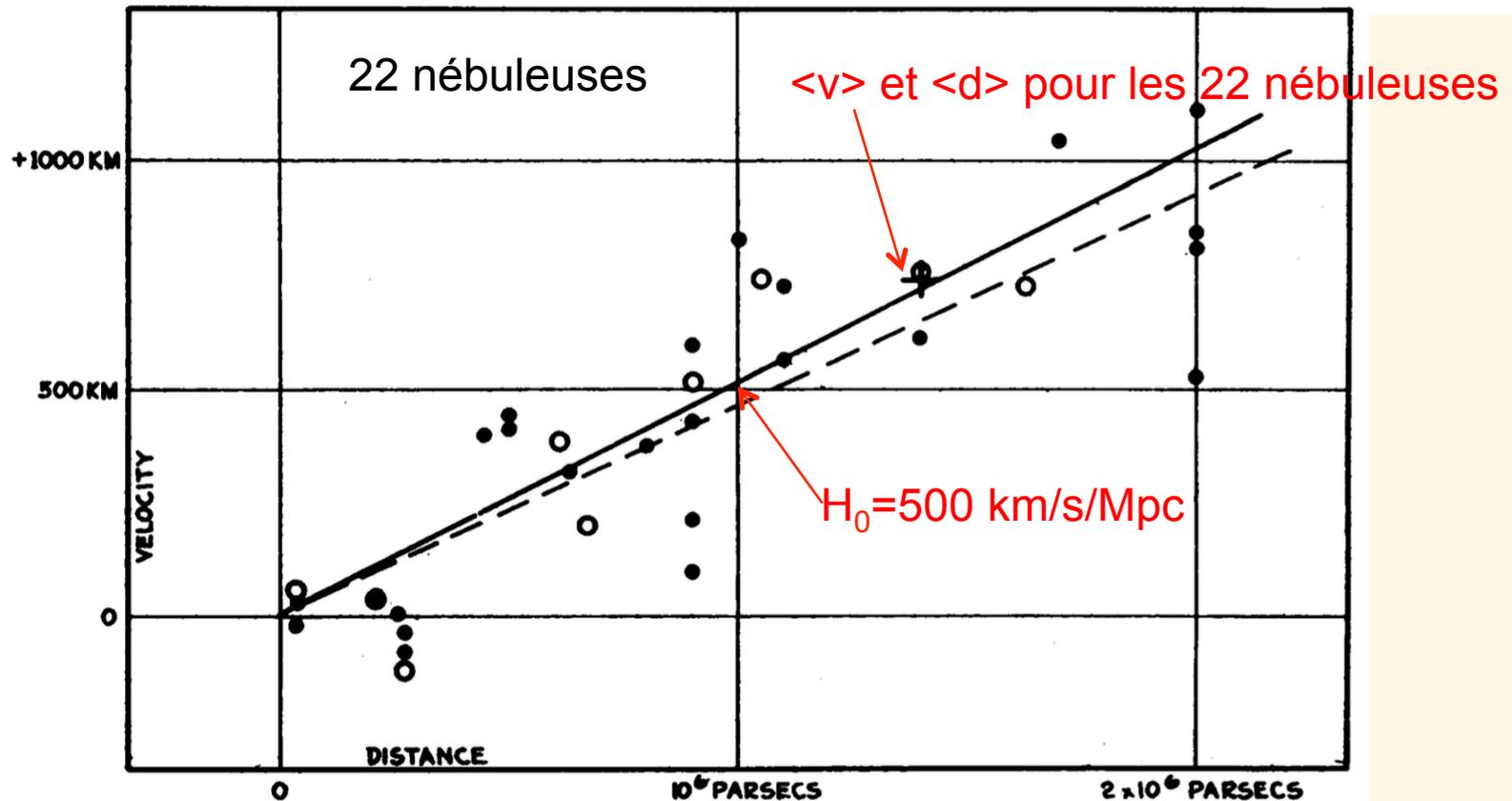


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

# A RELATION BETWEEN DISTANCE AND RADIAL VELOCITY AMONG EXTRA-GALACTIC NEBULAE

BY EDWIN HUBBLE

MOUNT WILSON OBSERVATORY, CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON

Communicated January 17, 1929

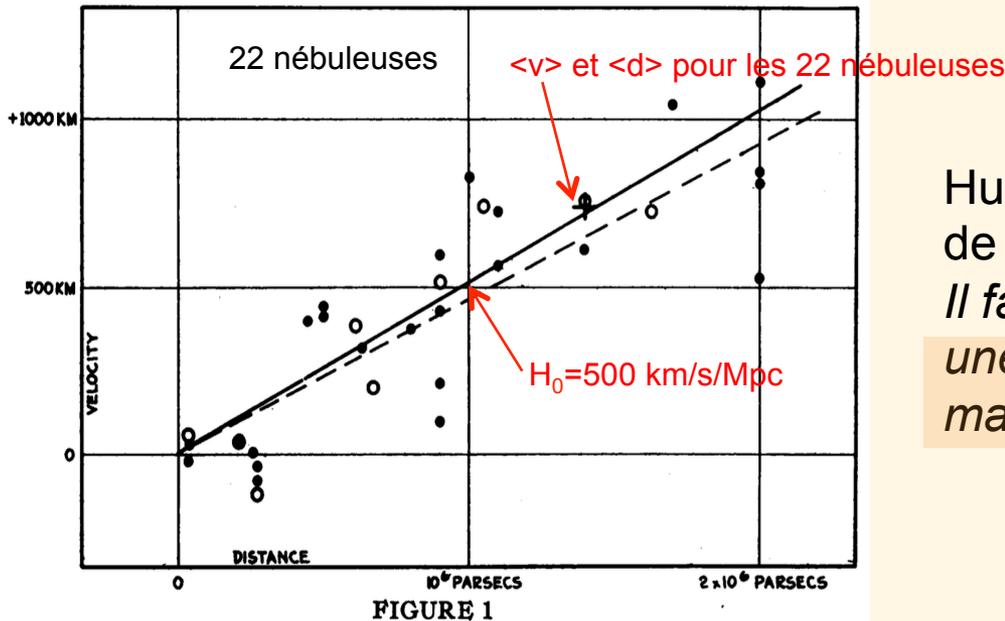


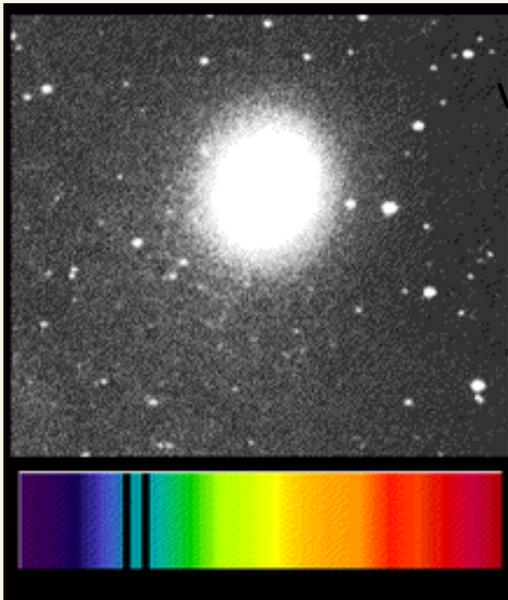
FIGURE 1  
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Hubble ne mentionne jamais l'expansion de l'univers...

Il fait uniquement référence à:  
*une tendance générale des particules de matière à s'éparpiller...*

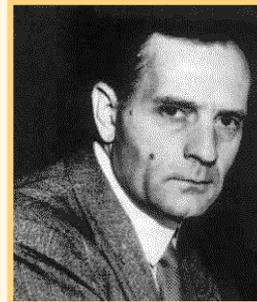
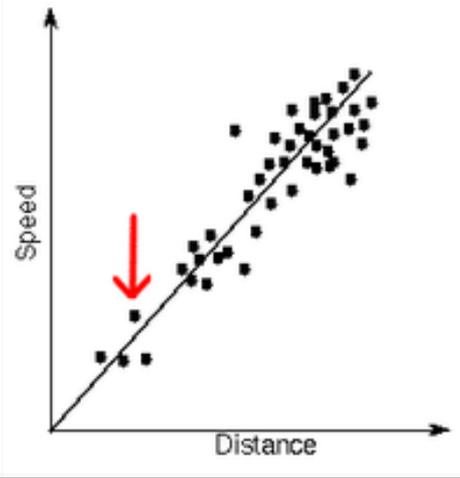
space. In the de Sitter cosmology, displacements of the spectra arise from two sources, an apparent slowing down of atomic vibrations and a general tendency of material particles to scatter. The latter involves an

# Les nébuleuses sont des "univers-îles"

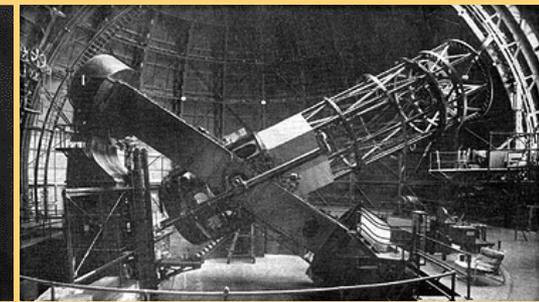


raies du Calcium (H & K)

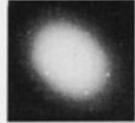
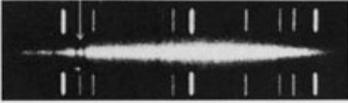
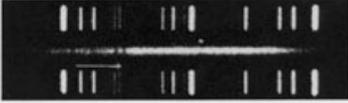
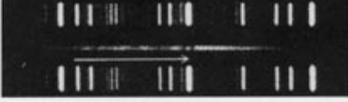
Loi de Hubble:  
vitesse =  $H_0 \times \text{distance}$



E. Hubble



Télescope 2.50m Mt Wilson

Cluster nebula in	Distance in light-years	Redshifts H + K
 Virgo	78,000,000	 1,200 km s <sup>-1</sup>
 Ursa Major	1,000,000,000	 15,000 km s <sup>-1</sup>
 Corona Borealis	1,400,000,000	 22,000 km s <sup>-1</sup>
 Bootes	2,500,000,000	 39,000 km s <sup>-1</sup>
 Hydra	3,960,000,000	 61,000 km s <sup>-1</sup>

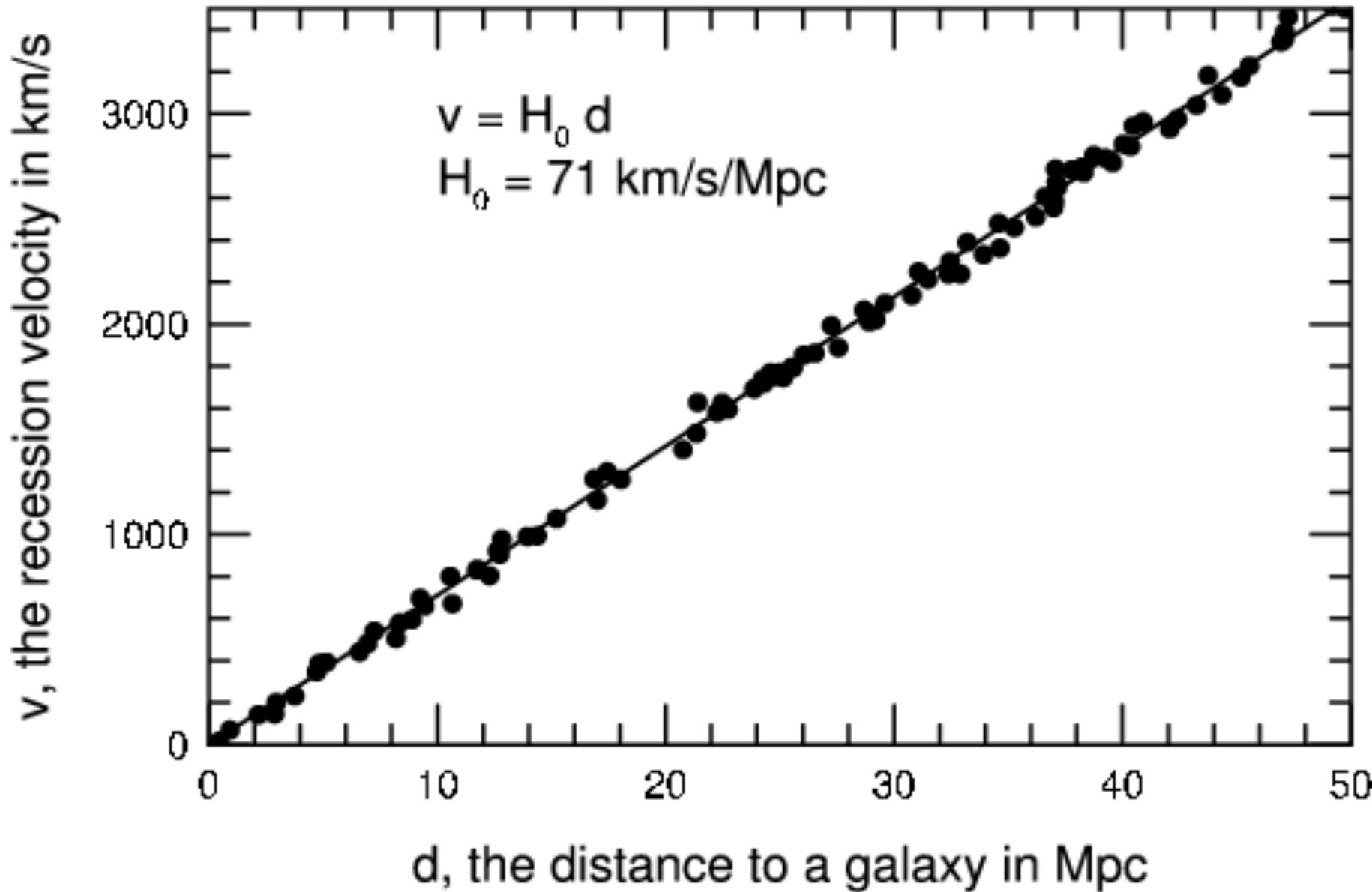
## THE LAW OF RED-SHIFTS

*George Darwin Lecture\**, delivered by Dr Edwin Hubble on 1953 May 8

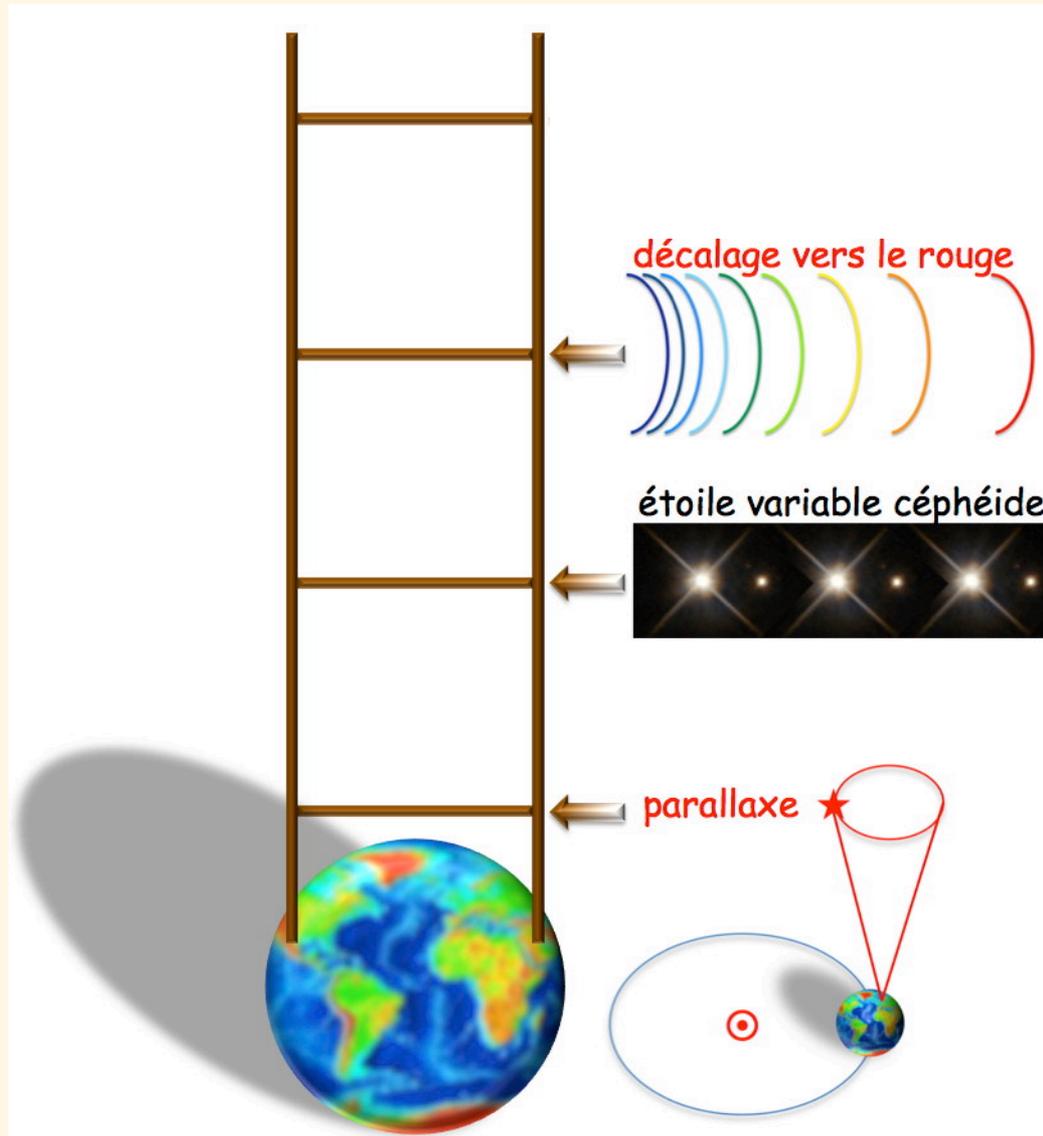
The problem was finally solved when the brightest stars in late-type spirals and irregular nebulae were established as suitable distance indicators, and were calibrated by Cepheids in a few of the nearest nebulae.

This new development started in 1923–24 when Cepheids were found in M 31 and M 33. The variables indicated the distances of the spirals, confirmed their suspected resolution and identified them as extragalactic stellar systems. Following up the clue, stars were soon recognized in many of the more conspicuous spirals, and the upper limits of brightness of these stars appeared to be substantially constant. It was this upper limit for the three or four brightest stars in great stellar systems which was used as a measure of distance. When, in 1928, it was applied to the nebulae with measured

# Hubble's Law



# Échelle des distances cosmiques



<b>Centre du monde observable</b>	<b>Taille du monde observable</b>	<b>Taille (km)</b>
Le centre du village « lococentrisme »	Le village et sa proche banlieue (préhistoire)	10-100 km
La Terre au centre du monde, « géocentrisme »	20 000 rayons terrestres (Ptolémée, II <sup>ème</sup> siècle)	$10^8$ km
Le Soleil au centre du monde, « héliocentrisme »	400 000 rayons terrestres (Copernic, 1543)	$10^{10}$ km
Le Soleil au centre de la Galaxie, « héliocentrisme galactique »	1000 fois la distance de Sirius (i.e. 8 600 années-lumière) (Herschel, 1785)	$10^{17}$ km
Le centre de la Galaxie (Soleil décalé) « galactocentrisme »	100 000 années-lumière (Shapley, 1918)	$10^{18}$ km
Le centre « relatif » d'expansion de l'univers « dynamocentrisme »	12 millions d'années-lumière (Hubble, 1929)	$10^{20}$ km

UN UNIVERS HOMOGENÈNE DE MASSE CONSTANTE ET DE RAYON CROISSANT,  
RENDANT COMPTE  
DE LA VITESSE RADIALE DES NÉBULEUSES EXTRA-GALACTIQUES

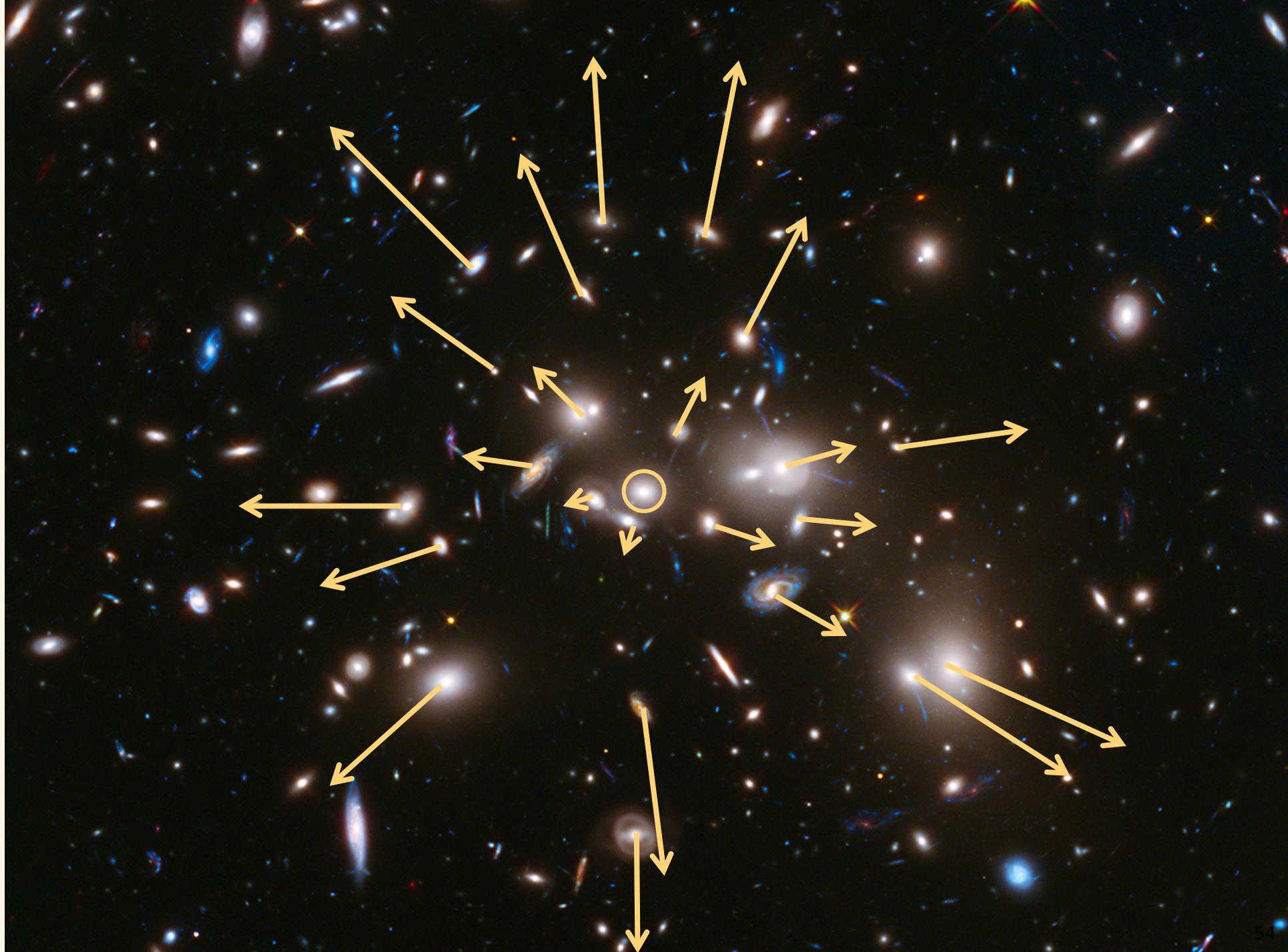
Note de M. l'Abbé G. LEMAÎTRE

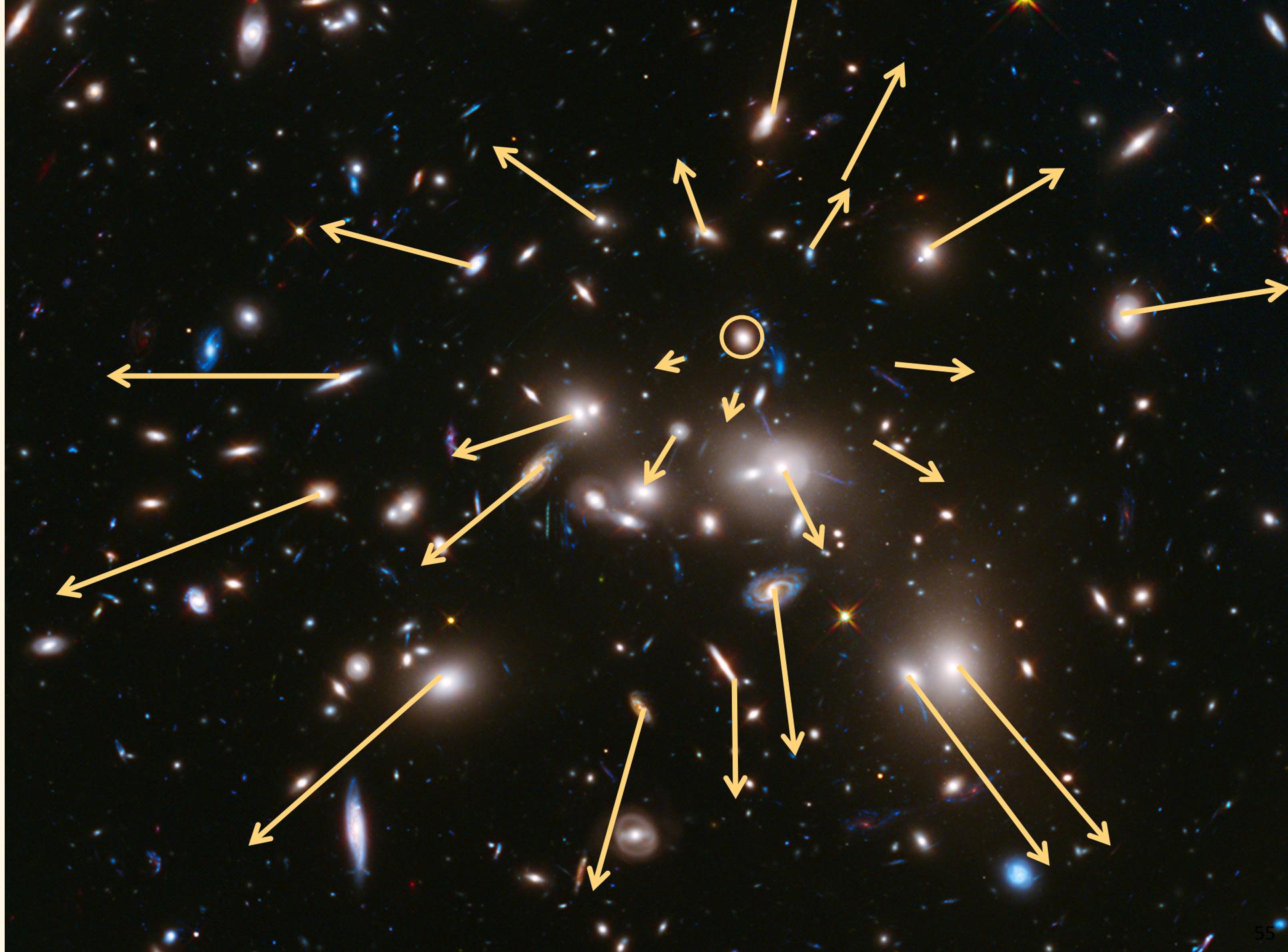
1927ASSB...47...49L

(<sup>2</sup>) En ne donnant pas de poids aux observations, on trouverait 670 Km./sec à  $1,16 \times 10^6$  parsecs, 575 Km./sec à  $10^6$  parsecs. Certains auteurs ont cherché à mettre en évidence la relation entre  $v$  et  $r$  et n'ont obtenu qu'une très faible corrélation entre ces deux grandeurs. L'erreur dans la détermination des distances individuelles est du même ordre de grandeur que l'intervalle que couvrent les observations et la vitesse propre des nébuleuses (en toute direction) est grande (300 Km./sec. d'après Strömberg), il semble donc que ces résultats négatifs ne sont ni pour ni contre l'interprétation relativistique de l'effet Doppler. Tout ce que l'imprécision des observations permet de faire est de supposer  $v$  proportionnel à  $r$  et d'essayer d'éviter une erreur systématique dans la détermination du rapport  $v/r$ . Cf. LUNDMARK. The determination of the curvature of space time in de Sitter's world M. N., vol. 84, p. 747, 1924, et STRÖMBERG, *l. c.*

*A Homogeneous Universe of Constant Mass and Increasing Radius  
accounting for the Radial Velocity of Extra-galactic Nebulae. By  
Abbé G. Lemaître.*

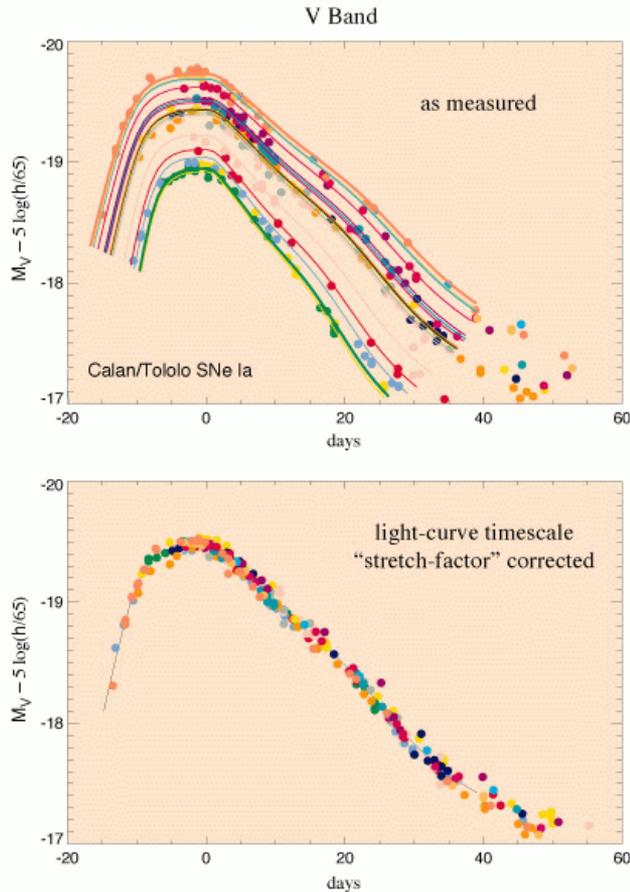
*(Translated by permission from "Annales de la Société scientifique de Bruxelles."  
Tome XLVII, série A, première partie.)* 1931MNRAS..91..483L



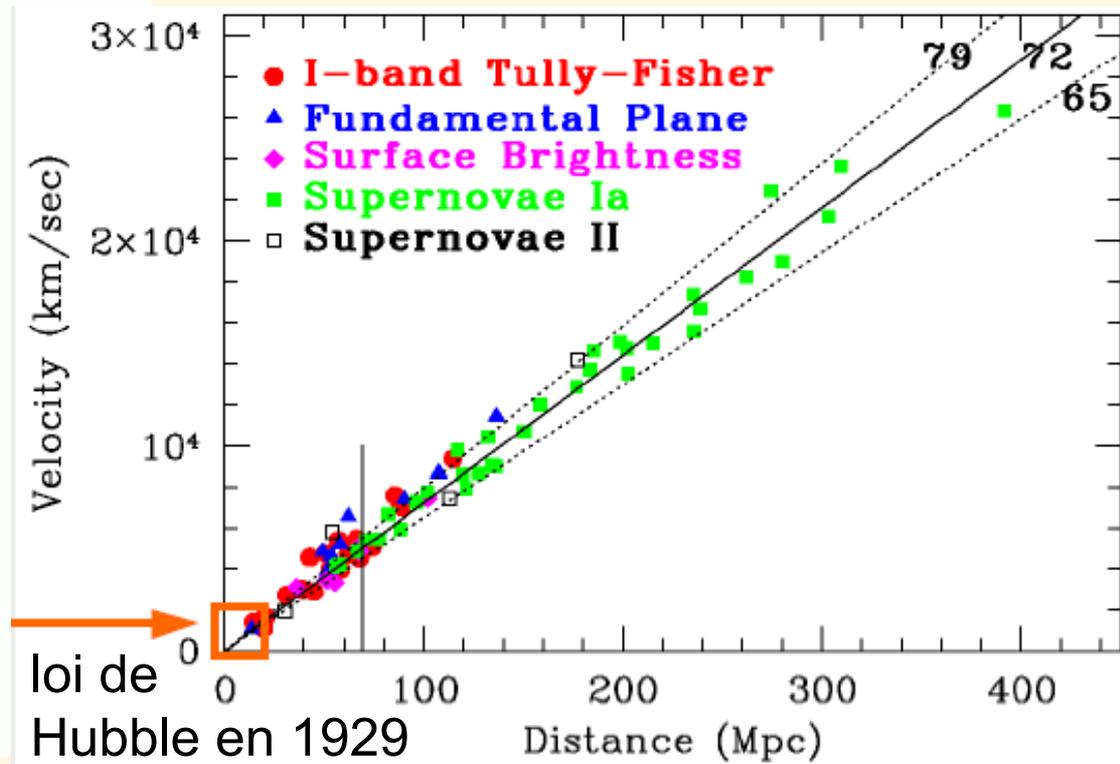


# Mesures de distances jusqu'à 400 Mpc

## Low Redshift Type Ia Template Lightcurves



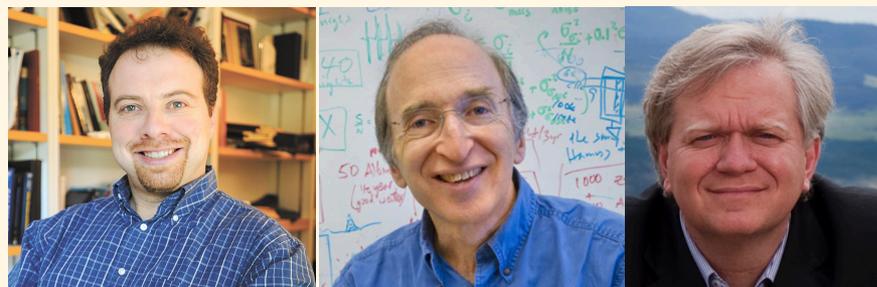
Courbe de lumière des SNIa=  
bougies universelles



Adam Riess: « quand vous lirez ce qui va suivre, ne croyez pas ce que votre cœur et votre raison voient mais ce que vos yeux voient »



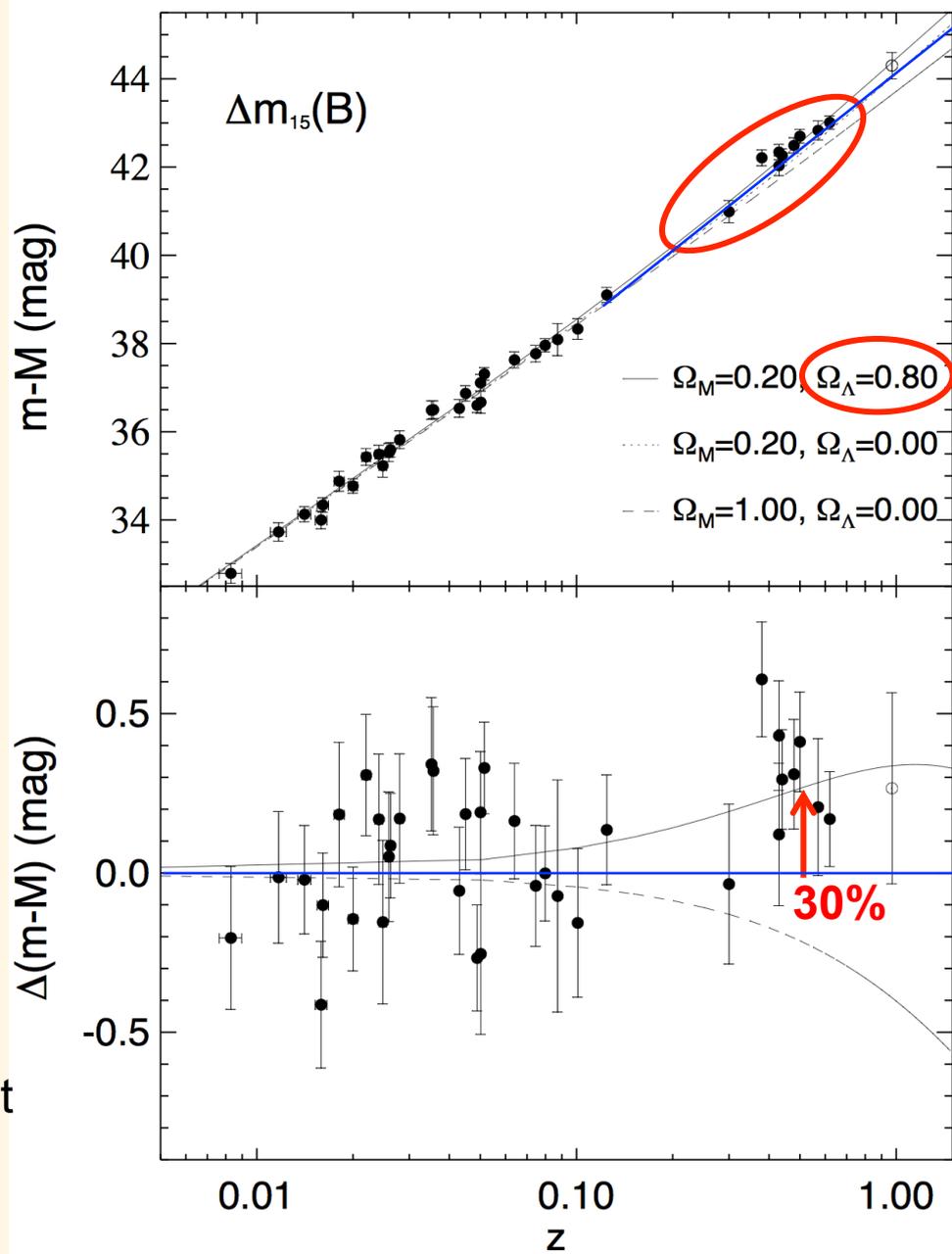
lauréats du prix Nobel 2011



Adam G. Riess

Saul Perlmutter

Brian P. Schmidt

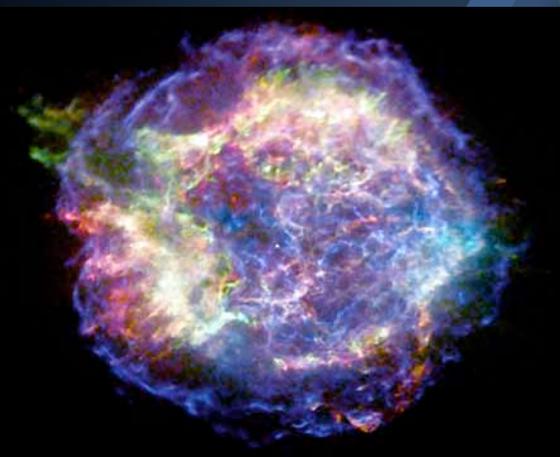


# Les chandelles standard pour mesurer l'expansion de l'univers



Les supernovae  
Le redshift  
Les céphéïdes

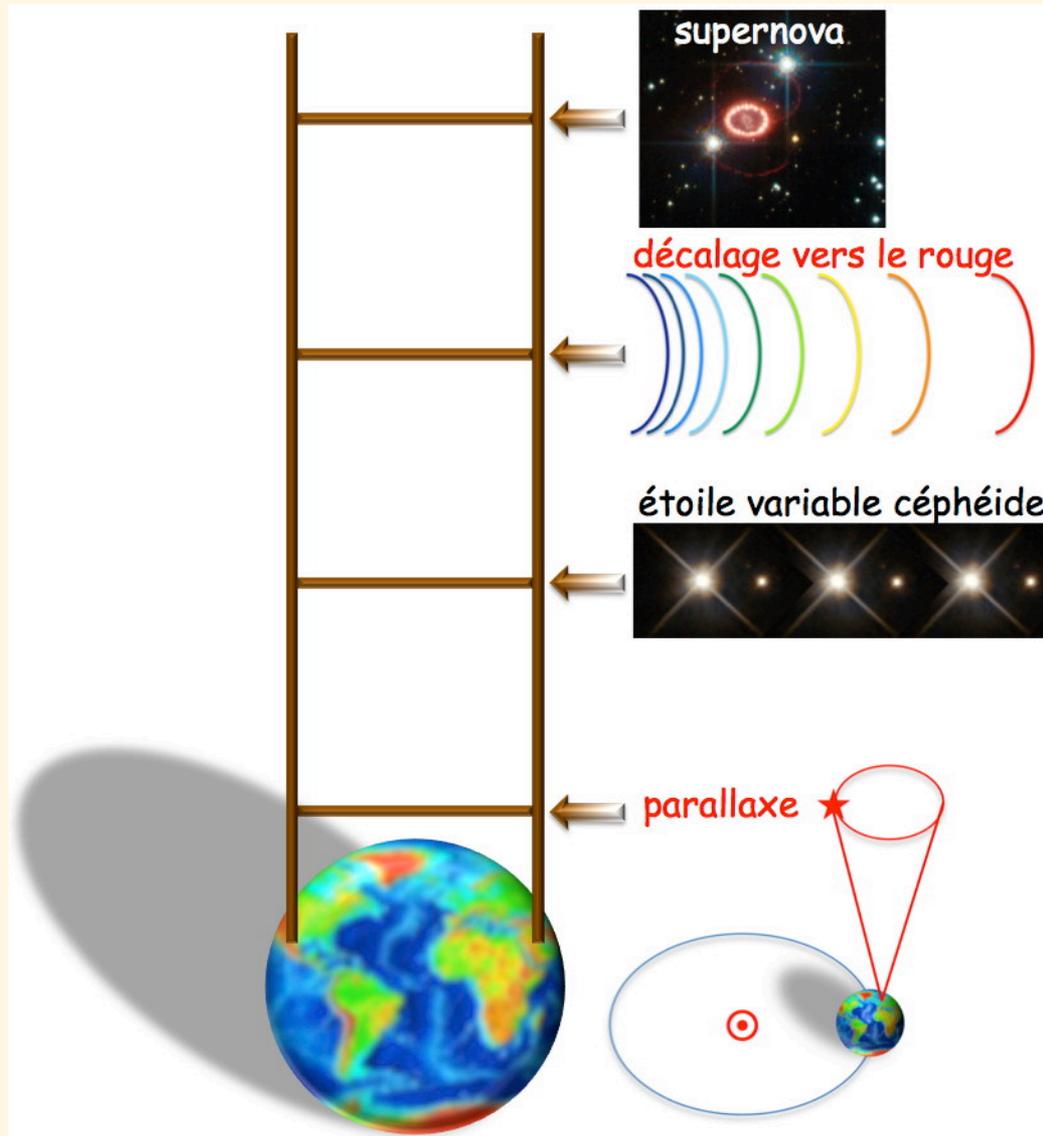
La parallaxe



Les supernovae lointaines sont 30% trop faibles  
Les distances sont donc plus grandes que prévu

→ L'expansion de l'univers accélère sous l'effet  
d'une énergie d'origine inconnue, « l'énergie noire »

# Échelle des distances cosmiques



# Le fond diffus cosmologique

Big Bang + 13,8 milliards d'années

Big Bang + 380 000 ans

42 millions d'a.l.

45 milliards d'a.l.



Penzias & Wilson 1965

Horizon cosmologique  
= horizon des particules  
= limite de l'univers observable

Les zones dont nous recevons aujourd'hui la lumière émise à la recombinaison étaient situées sur une sphère ayant un rayon de 42 millions d'années-lumière autour de nous.

# Le fond diffus cosmologique

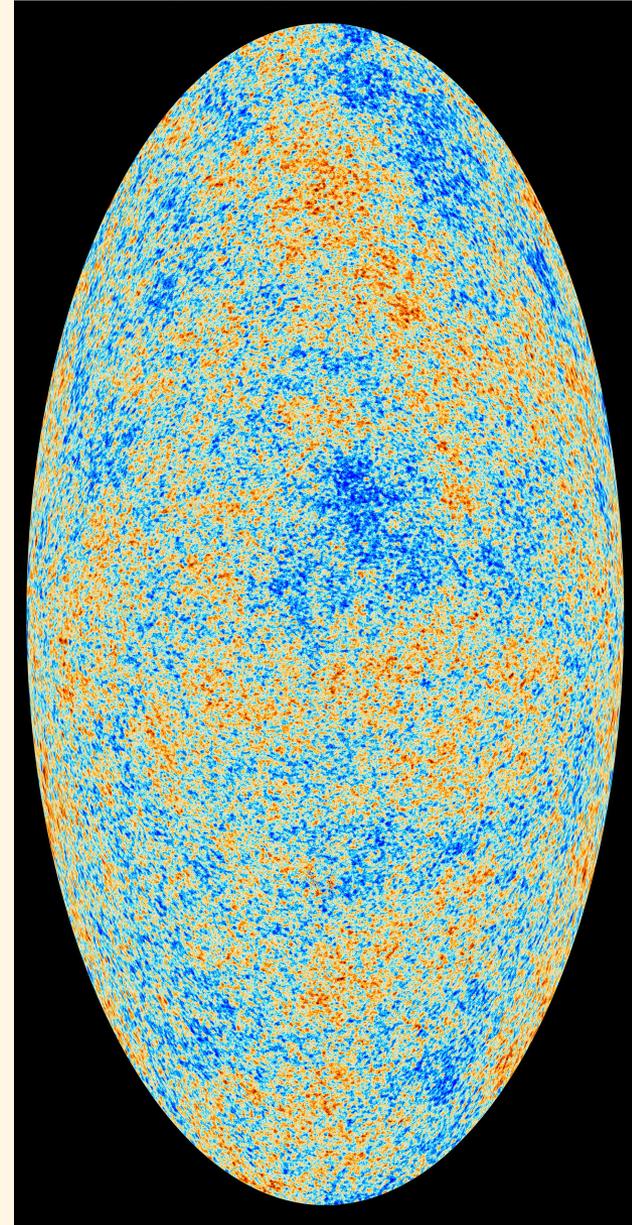
Big Bang + 13,8 milliards d'années

Big Bang + 380 000 ans

42 millions d'a.l.

45 milliards d'a.l.

Satellite Planck

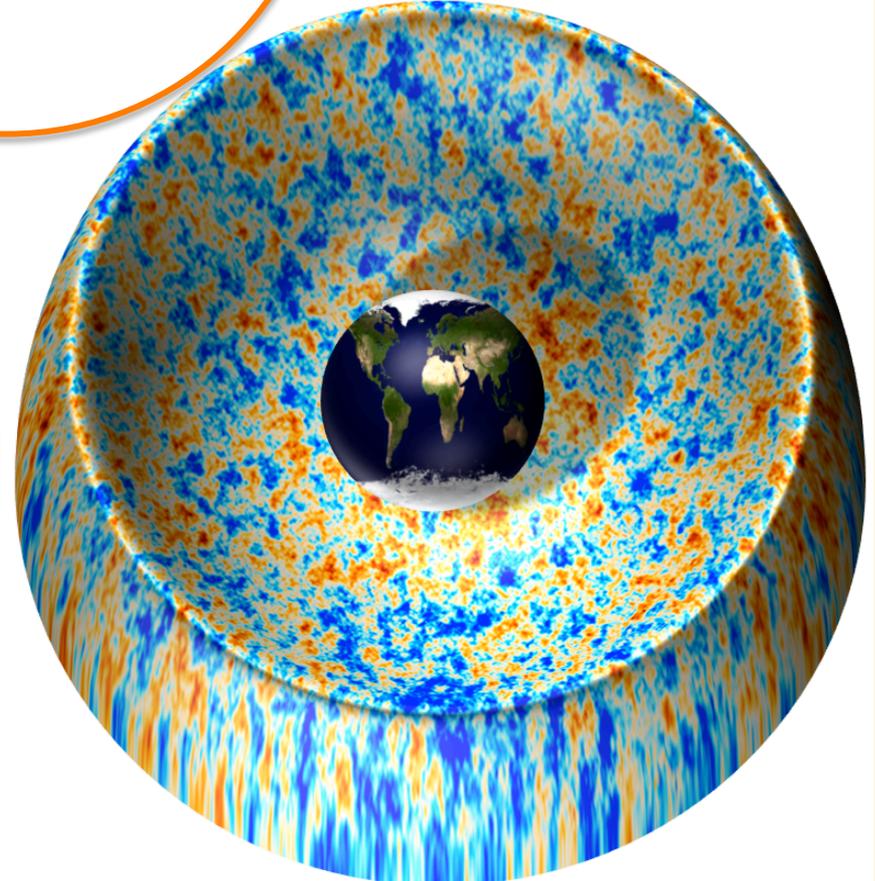
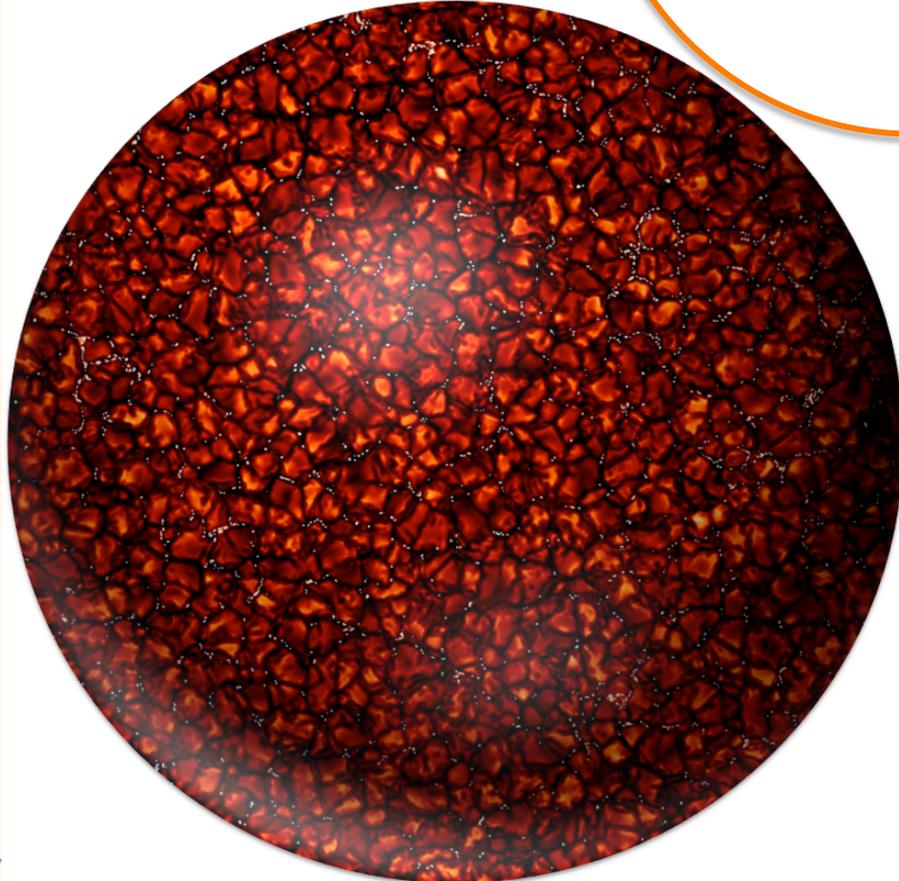


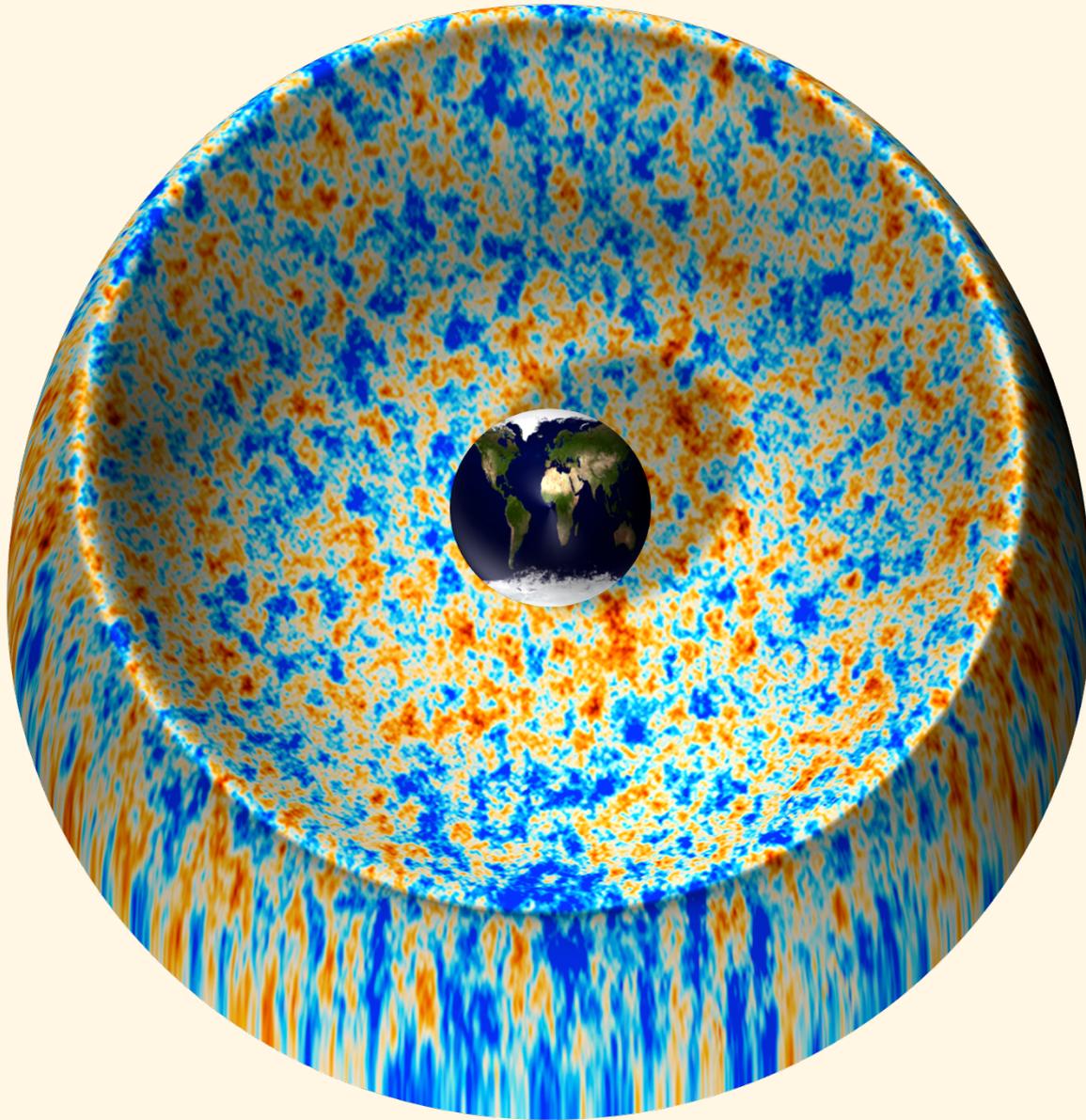
**Big Bang + 13,8 milliards d'années**

**Big Bang + 380 000 ans**

42 millions d'a.l.

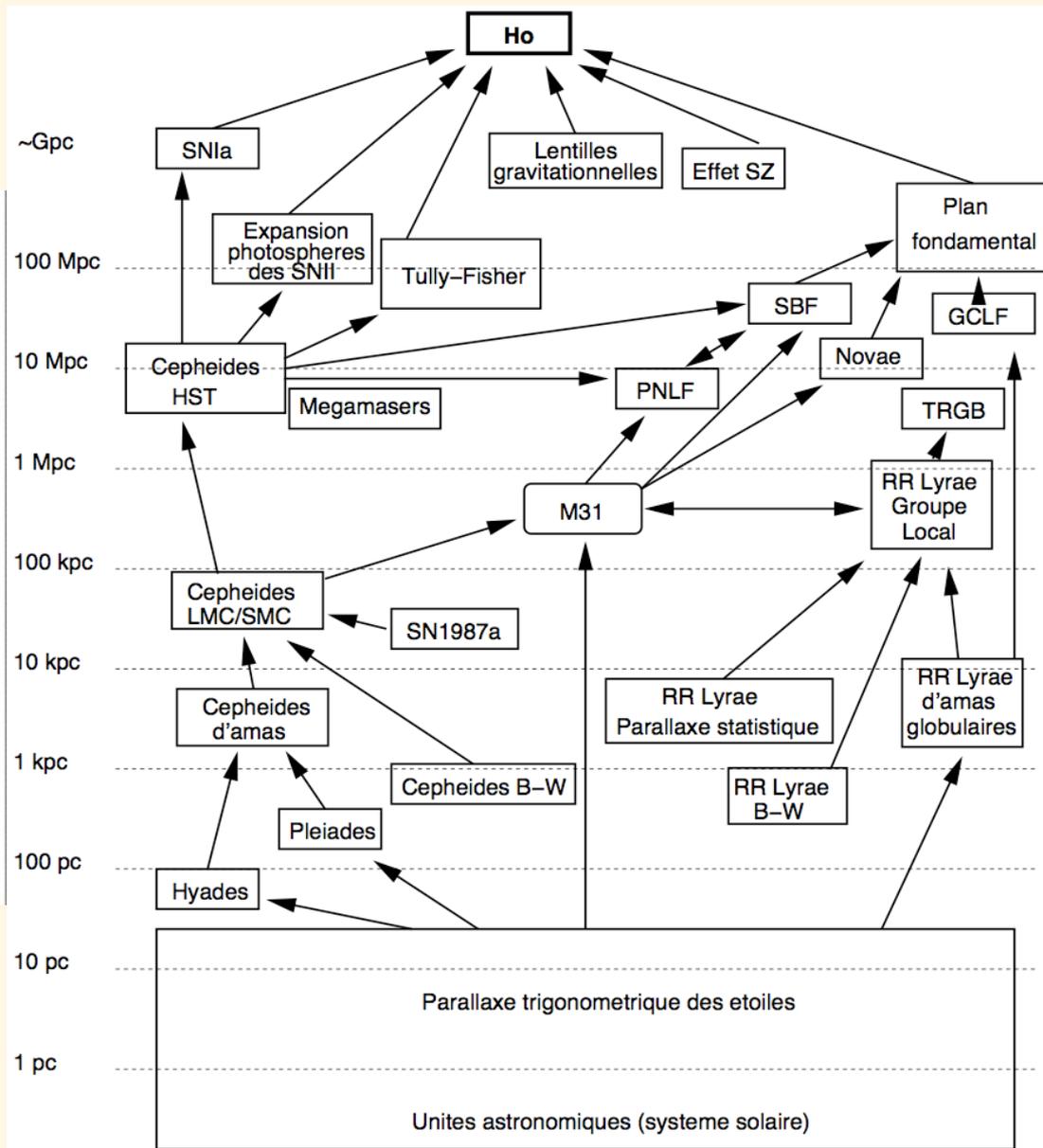
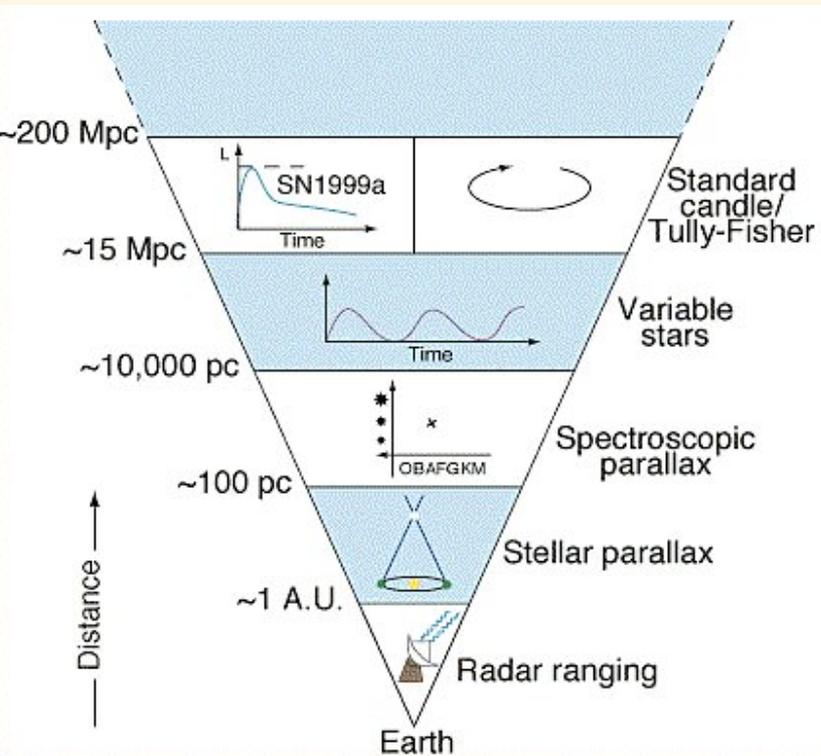
45 milliards d'a.l.

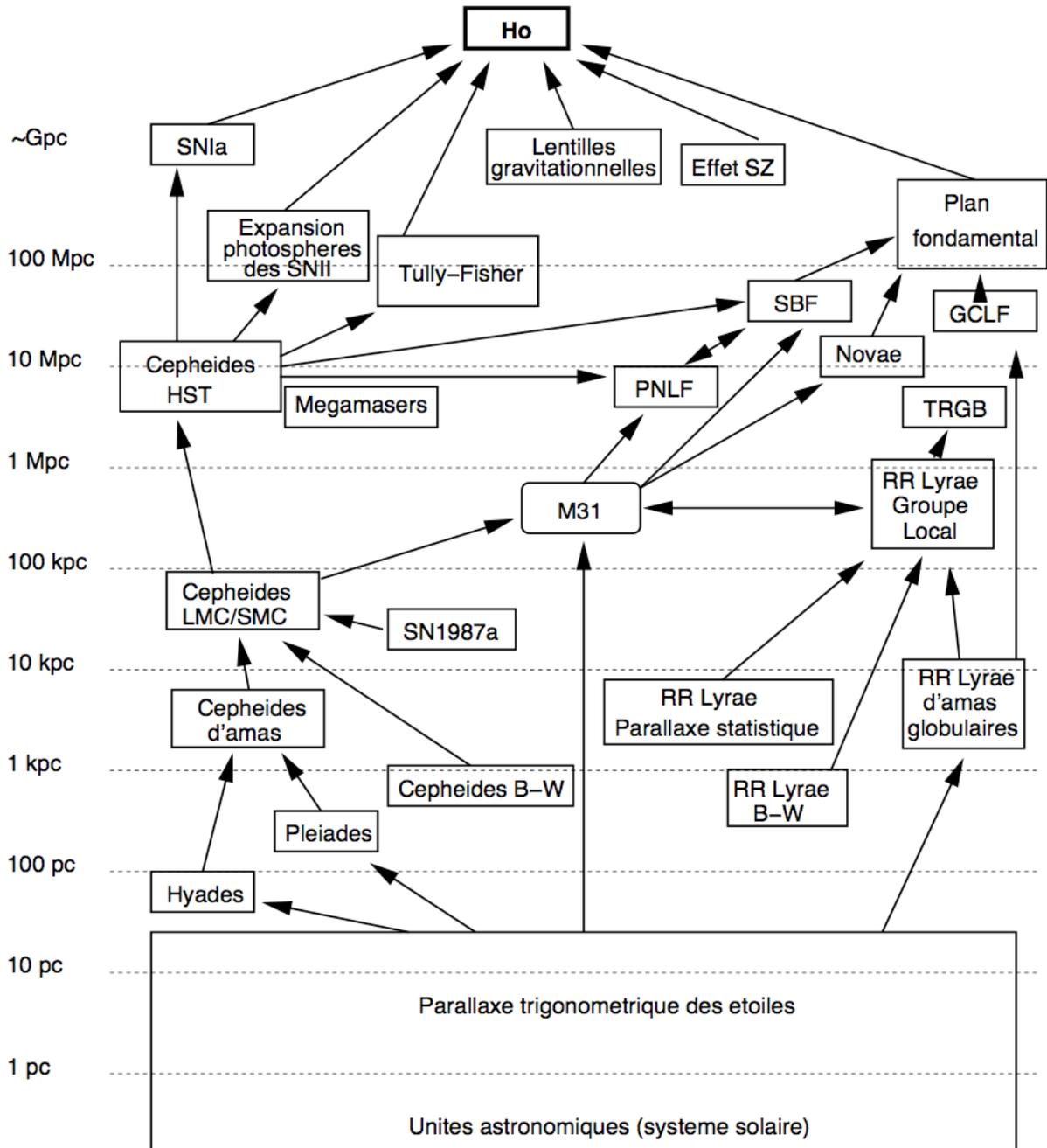




<b>Centre du monde observable</b>	<b>Taille du monde observable</b>	<b>Taille (km)</b>
Le centre du village « lococentrisme »	Le village et sa proche banlieue (préhistoire)	10-100 km
La Terre au centre du monde, « géocentrisme »	20 000 rayons terrestres (Ptolémée, II <sup>ème</sup> siècle)	$10^8$ km
Le Soleil au centre du monde, « héliocentrisme »	400 000 rayons terrestres (Copernic, 1543)	$10^{10}$ km
Le Soleil au centre de la Galaxie, « héliocentrisme galactique »	1000 fois la distance de Sirius (i.e. 8 600 années-lumière) (Herschel, 1785)	$10^{17}$ km
Le centre de la Galaxie (Soleil décalé) « galactocentrisme »	100 000 années-lumière (Shapley, 1918)	$10^{18}$ km
Le centre « relatif » d'expansion de l'univers « dynamocentrisme »	12 millions d'années-lumière (Hubble, 1929)	$10^{20}$ km
Le centre « relatif » de l'horizon cosmologique « horocentrisme »	90 milliards d'années-lumière (Penzias & Wilson 1965, Mather & Smoot 2006)	$10^{24}$ km

# L'échelle des distances cosmologiques



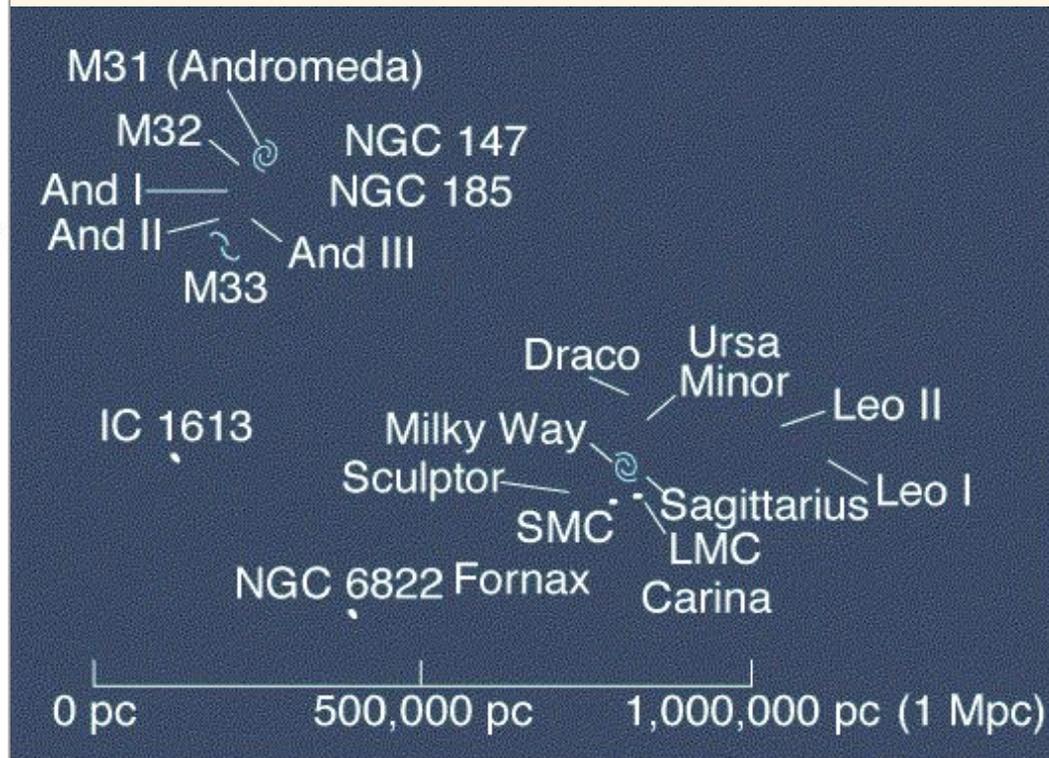
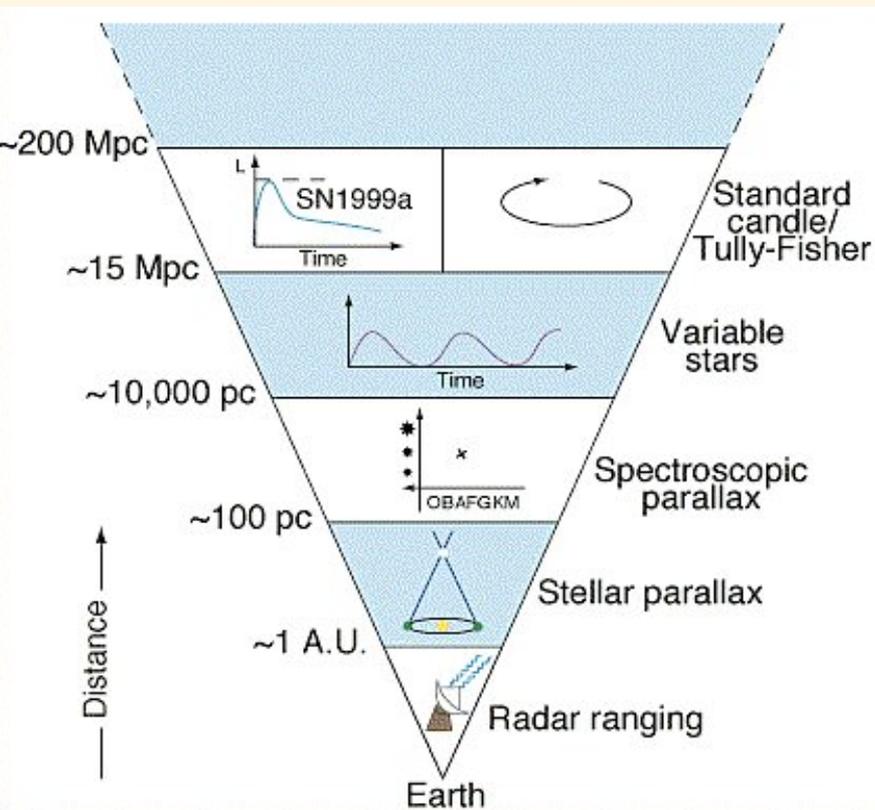


Webb 2001  
 "Measuring the Universe"  
 Springer

B-W =Baade-Wiesselink ; TRGB = Tip of the Red Giant Branch ; GCLF= Globular Cluster Luminosity Function  
 PNLF = Planetary Nebulae Luminosity Function ; SBF=surface Brightness Fluctuation; SZ=effet Sunyaev Zeldovich  
 David Elbaz - ET12 master M2 2016

# Indicateurs de distance

La relation de Tully-Fischer permet de déterminer les distances des galaxies entre 15 et 200 Mpc: En 1971, Tully & Fisher ont mis en évidence une loi qui relie la vitesse de rotation des galaxies spirales avec leur luminosité:  $L \sim V^4$ , où  $V$  est la vitesse du gaz que l'on mesure grâce à la largeur de ses raies en émission. Au-delà, on utilise les distances cosmologiques mesurées par le redshift. En-deçà, on utilise les étoiles variables de type céphéides. Ces dernières suffisent à répertorier les galaxies du Groupe Local. Elles-mêmes ont été calibrées à partir de la méthode des parallaxes.



# Loi de Tully-Fisher pour les galaxies Spirales

- En 1971, Tully & Fisher ont mis en évidence une loi qui relie la vitesse de rotation des galaxies spirales avec leur luminosité:  $L \sim V^4$ , où  $V$  est la vitesse du gaz que l'on mesure grâce à **la largeur de ses raies en émission**.
- La mesure de la magnitude apparente et de la vitesse de rotation est donc reliée à la distance des galaxies et cette loi est un **indicateur de distance**.
- Voici l'origine physique de cette loi:

- Théorème du Viriel (gravité):  $V^2 = \frac{GM}{R} \Rightarrow M \sim RV^2$

- Rapport masse sur luminosité supposé universel :  $M = L \left( \frac{M}{L} \right)$

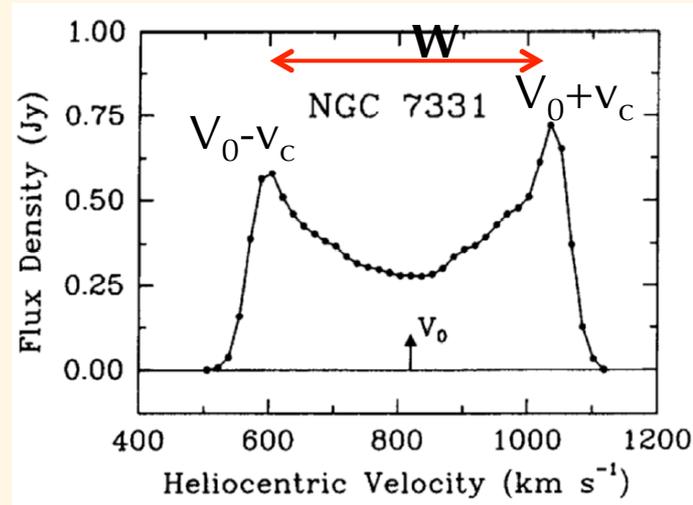
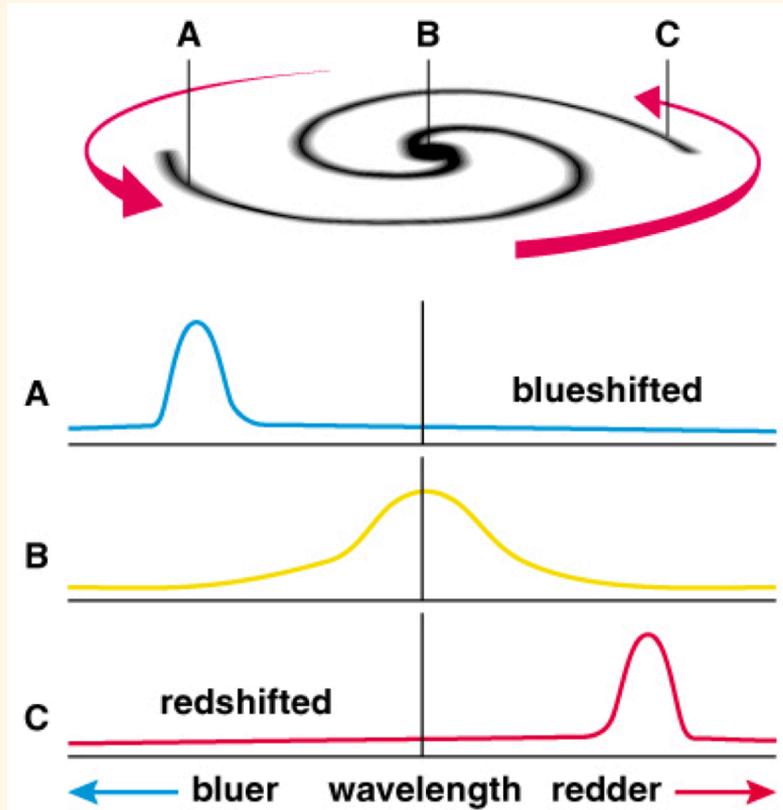
- Brillance de surface:  $\Sigma = \frac{L}{surface} \sim \frac{L}{R^2} \Rightarrow R \sim \sqrt{\frac{L}{\Sigma}}$

$$\sqrt{\frac{L}{\Sigma}} V^2 \sim L \left( \frac{M}{L} \right) \Rightarrow L \sim \frac{V^4}{\Sigma \left( \frac{M}{L} \right)^2}$$

Nous voyons donc que la loi de Tully-Fisher repose sur l'hyp. que la brillance de surface et le rapport  $M/L$  sont universels pour les galaxies spirales.

Cette loi a aussi été utilisée pour mesurer  $H_0$ , la constante de Hubble

# Loi de Tully - Fischer



$V_c$ : vitesse circulaire de rotation du gaz dans le disque de la galaxie :  $2v_c \sin \theta = W$   
 où  $\theta$  est l'inclinaison du disque de la galaxie.

$$L_B = \frac{V^4}{\Sigma_B \left(\frac{M}{L_B}\right)^2} = 10^{-0.4(m_B^{AB} - 8.9)} \times 4\pi d^2 \times 10^{-26} [\text{W Hz}^{-1}]$$

loi de Freeman:  $\Sigma_B = I_0^B = I(h) = 21.67 \pm 0.3 \text{ mag. B/}''^2$

$$M/L_B \approx 5 M_\odot/L_\odot$$

# Mesures de distances par Tully-Fischer

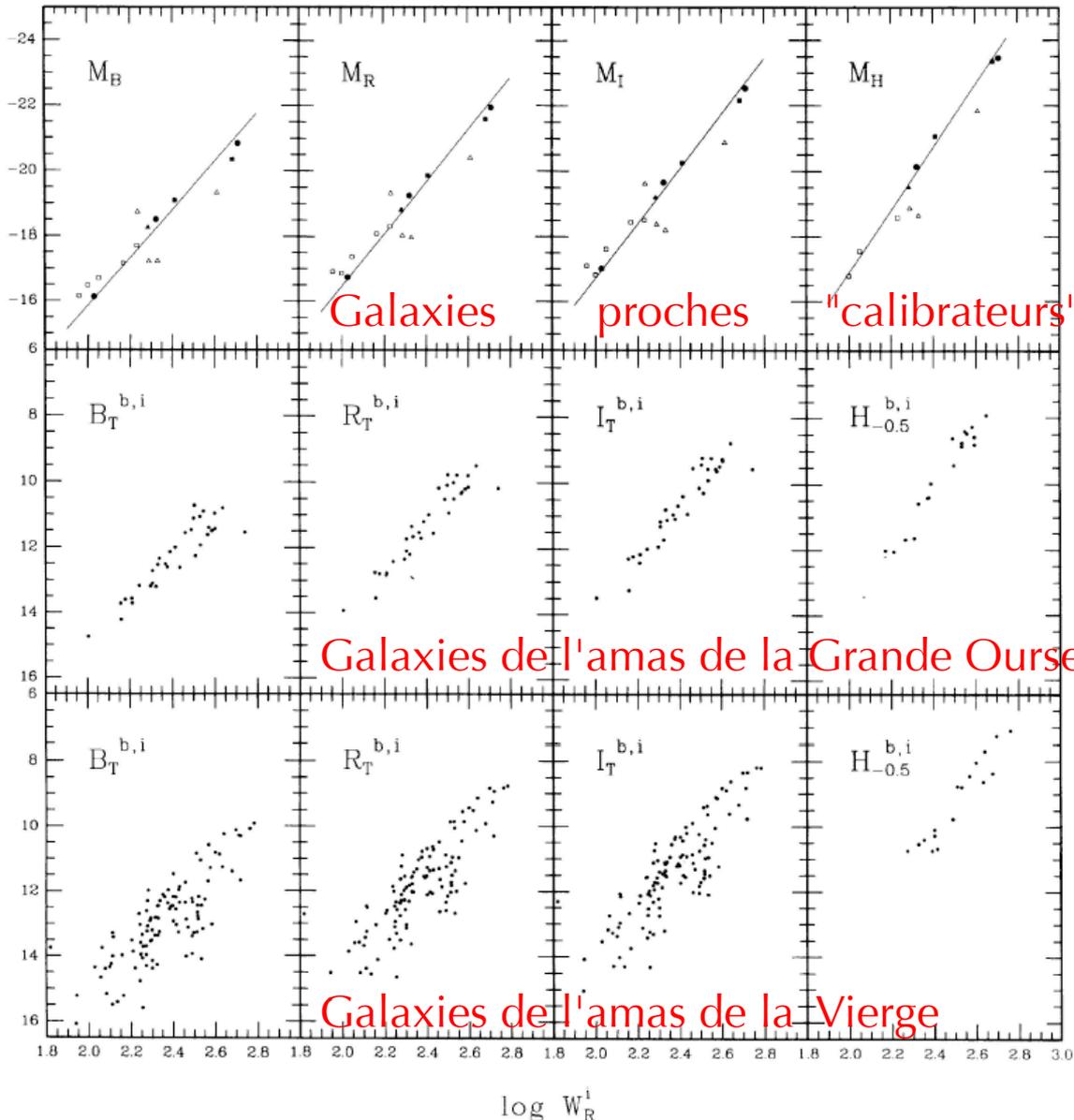


Fig. de Jacoby et al. (1992, PASP 104, 5999). En abscisse:  $W_i=2v_c$ .

La pente des corrélations augmente et la dispersion diminue en allant vers les grandes longueurs d'ondes (de B vers H) car l'effet des étoiles jeunes diminue de B vers H

(le poids relatif des étoiles jeunes dépend de l'histoire de formation d'étoiles des galaxies et introduit une source de dispersion aux petites longueurs d'ondes)

# Loi de Faber-Jackson pour les galaxies Elliptiques

- Dans le cas des galaxies elliptiques,  $L \sim \sigma^4$ , où  $\sigma$  est la dispersion de vitesse des étoiles au centre des galaxies (là où le rapport signal sur bruit, S/N, est le plus élevé). C'est la **loi de Faber-Jackson**.

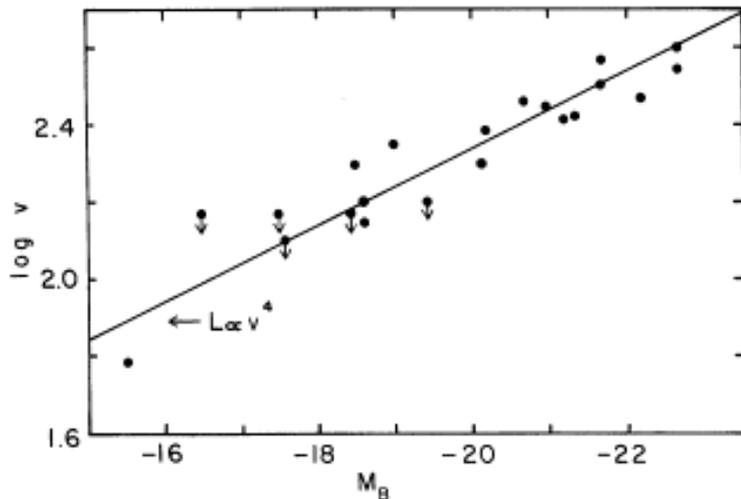
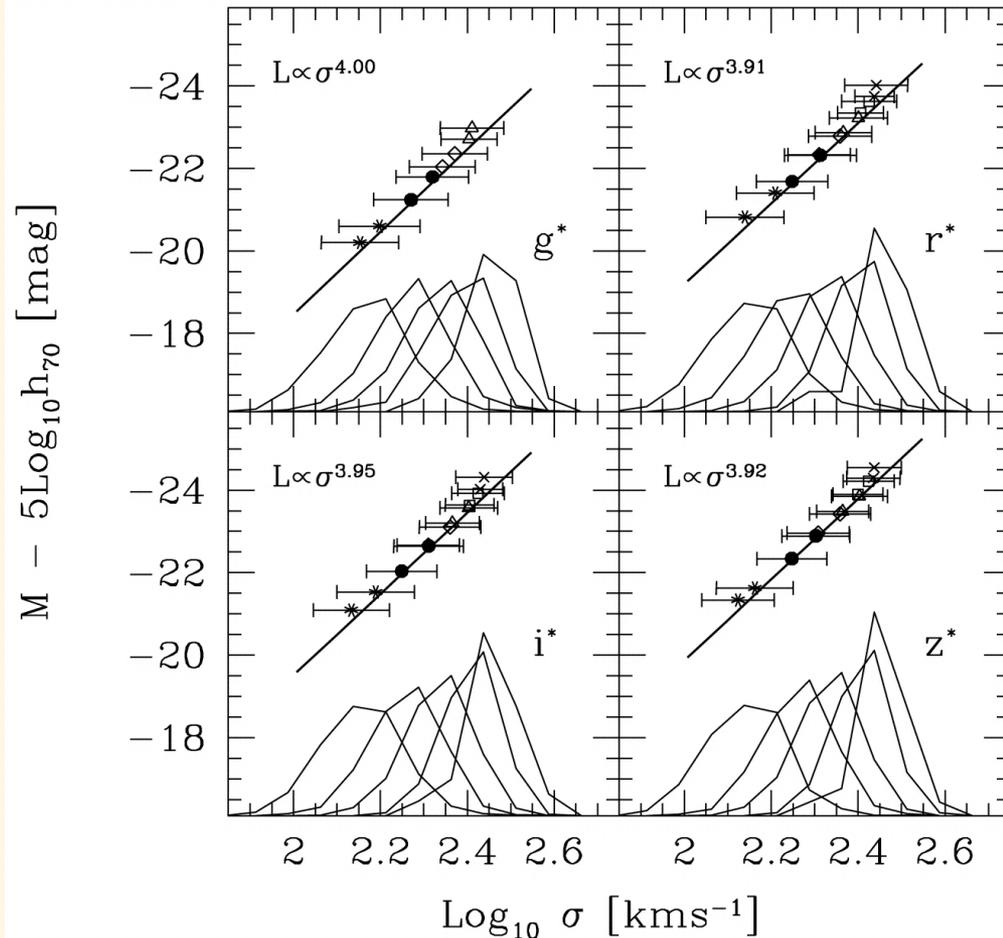


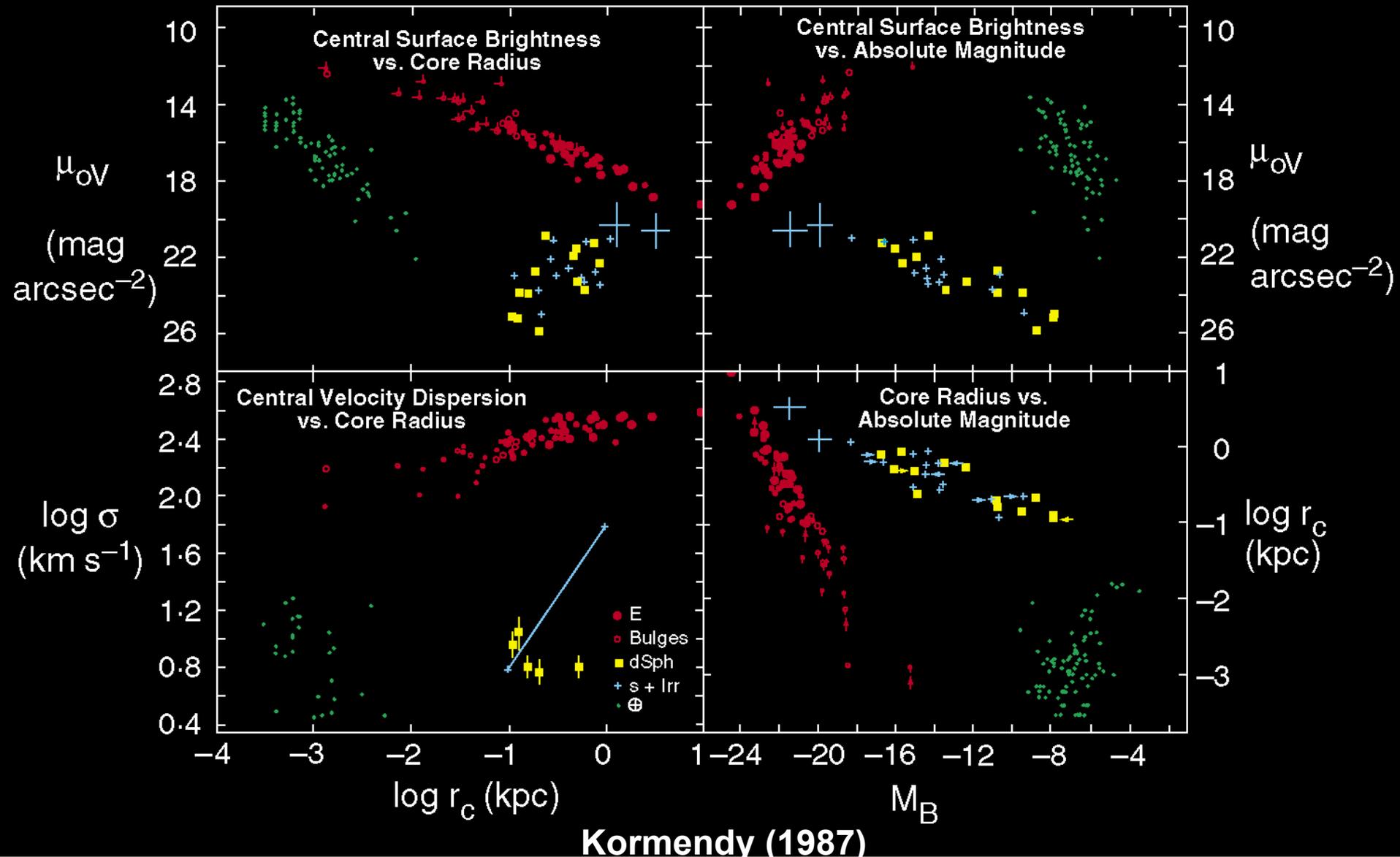
FIG. 16.—Line-of-sight velocity dispersions versus absolute magnitude from Table 1. The point with smallest velocity corresponds to M32, for which the velocity dispersion ( $60 \text{ km s}^{-1}$ ) was taken from Richstone and Sargent (1972).

**Faber & Jackson (1976)**



**Bernardi et al. (2003)**

# Corrélations entre (Brillance de surface, rayon de cœur, dispersion de vitesse et magnitude absolue) pour les galaxies Elliptiques



# Plan fondamental pour les galaxies Elliptiques

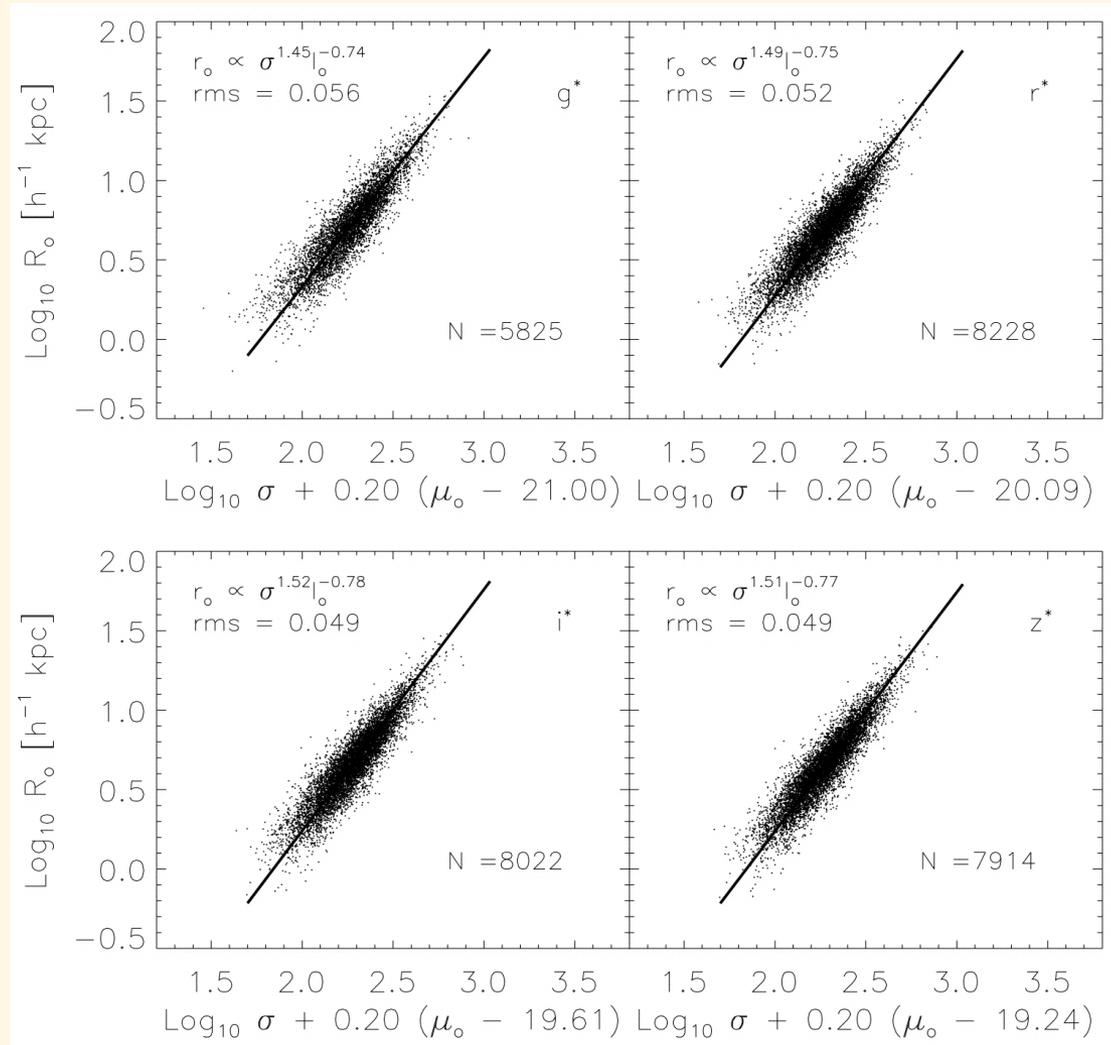
- Un changement de variables permet de minimiser la dispersion qui relie les trois variables ( $\log R_e, I_e, \log \sigma_0$ ):
- On appelle cette relation le "plan fondamental".

La faible dispersion observée pour un grand nombre de galaxies E implique que celles-ci ont eu une histoire de formation d'étoiles très similaire, d'autant plus que l'on a aussi constaté l'existence d'un plan fondamental en utilisant :

B-V; l'indice  $Mg_2$

qui présentent l'avantage de ne pas nécessiter de connaître la distance des galaxies.

L'indice  $Mg_2$  est calculé à partir de largeurs équivalentes des raies en absorption du magnésium, il caractérise la métallicité.



## La relation $D_n$ - $\sigma$ pour les galaxies Elliptiques

- Un groupe de sept astronomes que l'on a surnommé les "7 samourais" a introduit une taille caractéristique des galaxies,  $D_n$ , qui est directement reliée à leur dispersion de vitesse grâce à une très faible dépendance en  $I_e$ .
- $D_n$  = le diamètre à l'intérieur duquel on mesure une magnitude apparente en B des galaxies de 20.75 mag par secondes d'arc carrées, i.e.  $D_n$  est associé à une brillance de surface:  $D_n \sim \sigma^{1.4} (I_e^{0.07})$ . On parle de la relation  $D_n$ - $\sigma$ .
- Les 7 samourais:  
Dressler, Alan; Lynden-Bell, Donald; Burstein, David; Davies, Roger L.; Faber, S.M.; Terlevich, Roberto; Wegner, Gary; 1987, ApJ 313, 42

# Les grands catalogues de galaxies

- William Herschel (1738-1822), sa soeur et son fils répertorient 2500 nébuleuses (2 hémisphères) inspirés par Messier (avec télescope de 47.5 cm, puis en 1789, fabrique un télescope de 1.20 m, le plus grand pendant 50 ans !).
- William Herschel est le découvreur de l'infrarouge (en mesurant la température de la lumière sortant d'un prisme au-delà du rouge...), d'où le nom du futur satellite européen infrarouge, Herschel.
- **General Catalog (GC)**: par le fils de W.Herschel, John Herschel, publié en 1864 et contenant **5079 galaxies nommées GC#**
- Un siècle plus tard, J.L.E. Dreyer, publie le **New General Catalog** (1888, Mem. Roy. Astron. Soc.49), en abbréviation **NGC qui contient 7840 galaxies.**

Puis deux catalogues complémentaires:

**IC= Index Catalog**, version I en 1895 (IC I) et II en 1907 (IC II) (**5086 galaxies**)

Il utilisa un télescope de 1.80m appelé "Leviathan" car c'était le plus grand télescope de l'époque

***Toutes les images des galaxies NGC sont dans : [http://ngcic.org/dss/dss\\_ngc.htm](http://ngcic.org/dss/dss_ngc.htm)***

# Les grands catalogues de Galaxies proches

"M..."= catalogue de Messier (en 1784) :	<b>37 galaxies</b>
"NGC..."= New General Catalog :	<b>7840 galaxies</b>
"IC..."= Index Catalog	<b>5386 galaxies</b>

Ces catalogues ont été utilisés et complétés pour générer des catalogues complets de galaxies locales jusqu'à une certaine magnitude observée limite (<http://cdsweb.u-strasbg.fr/cats/Cats.htx>) :

**Revised Shapley-Ames catalog (RSA):** Sandage & Tammann (1981). Ce catalogue contient **1249 galaxies de magnitudes  $m_B \leq 13$**  sur tout le ciel (catalogue complet). C'est une révision du catalogue de Shapley-Ames (1932; 1246 galaxies). Ce catalogue contient les positions, magnitudes B, types de Hubble (morphologie) et redshifts des gal.

(cf [http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/Shapley\\_Ames/RSA\\_contents.html](http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/Shapley_Ames/RSA_contents.html))

**Reference Catalog of Galaxies (RC3):** de Vaucouleurs. 11897 galaxies avec  $m_B \leq 15.5$  et  $cz \leq 15000$  km s<sup>-1</sup>: RC1 (1964): 2599 galaxies, RC2 (1976): 4364 galaxies, RC3 (1991): 23024 gal. Le catalogue contient les positions, magnitudes, tailles et redshifts (si disponibles).

**Uppsala General Catalog (UGC):** Nilson (1973) à partir du Palomar Sky Survey. 12921 galaxies de diamètre apparent  $> 1'$  (+  $m_B \leq 14.5$  issues du CGCG). Le catalogue contient les positions, types, magnitudes, tailles et redshifts (si disponibles). Seulement hémisphère Nord ( $\delta > -2^\circ 30'$ )

**Catalog of Galaxies & Clusters of Galaxies (CGCG):** Zwicky (1961-1968). 29363 galaxies  $m_B \leq 15.7$

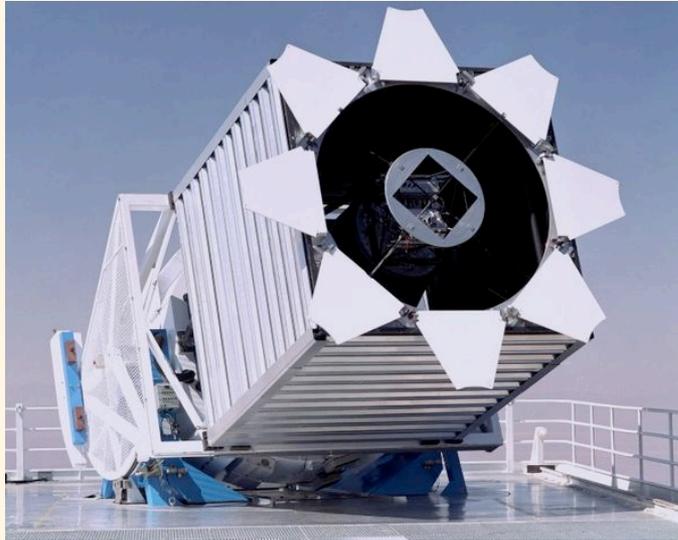
**Morphological Catalog of Galaxies (MCG):** Vorontsov-Vel'yaminov (1962-68). 29000 galaxies avec ( $90^\circ > \delta > -33^\circ$ )  $m_B \leq 15.1$  + types morphologiques (classification complexe)

# Dénomination de galaxies plus récentes

- X: CXO JHHMMSS.s+DDMMSS objets détectés par Chandra X-Ray Observatory
- XMM JHHMM.m+DDMM objets détectés par l'Observatoire XMM-Newton
- ultra-violet: GALEX JHHMMSS.ss+DDMMSS.ss Galaxy Evolution Explorer
- visible sol: SDSS JHHMMSS.ss+DDMMSS.s Sloan Digital Sky Survey
- 2dFGRS AFFFZNNN (ID suivi du redshift) 2dF Galaxy Redshift Survey
- 2dF GHHMMADDMMA 2dF Survey (2 degree field)
- visible espace: HST JHHMMSS+DDMMm Hubble Space Telescope
- IR poche: 2MASS JHHMMSSss+DDMMSSs 2Micron All Sky Survey
- IR moyen et lointain: IRAS HHMMm+DDMMa IRAS Point Sources (InfraRed Astronomical Satellite)
- Radio: VLA JHHMMSS+DDMMSS VLA (Very Large Array)

# Sloan Digital Sky Survey

- télescope 2.5m ! Observations de Mai 1998 à Juillet 2008 = 10 ans !
- catalogues SDSS-I (1998-2005) et SDSS-II (2005-2008). SDSS-III (2008...2014)
- 230 millions d'objets sur 8400 deg.carré (20% du ciel) jusqu'à la magnitude 23 avec positions et luminosités. Spectres pour 930,000 galaxies et 120,000 quasars.



2.5m, Apache Point Observatory, New Mexico  
120-megapixel camera, 1.5 square degrees  
2 spectrographes à fibres optiques mesurent 600 spectres/observation

# Recherches d'informations sur le WEB

NED: <http://nedwww.ipac.caltech.edu/>

## NASA/IPAC EXTRAGALACTIC DATABASE

- ▶  [Spectra](#)
- ▶  [Derived Values - Corrected Velocities, Hubble Flow Distances and Scales](#)
- ▶  [Literature filters with Data Content & Topical Keywords](#)
- ▶  [116,564 SDSS DR5 galaxies and QSOs with Redshifts](#)
- ▶  [NED Database of Distances, Level 1 \(NED-1D\)](#)
- ▶ [News - Contents and Capabilities](#)
- ▶ [Frames](#)



 OBJECTS	 DATA	 LITERATURE	 TOOLS	 INFO
<a href="#">By Name</a>	<a href="#">Images By Object Name or By Region</a>	<a href="#">References by <b>Keywords</b> Object Name</a> <small>NEW</small>	<a href="#">Coordinate Transformation &amp; Extinction Calculator</a> <a href="#">Velocity Calculator</a>	<a href="#">FAQ</a> <a href="#">Introduction</a>
<a href="#">Near Name</a>	<a href="#">Photometry &amp; SEDs</a>	<a href="#">References by <b>Keywords</b> Author Name</a> <small>NEW</small>	<a href="#">Cosmology Calculators</a> <a href="#">Extinction-Law Calculators</a>	<a href="#">Features</a>
<a href="#">Near Position</a>	<a href="#">Spectra</a> <small>NEW</small>	<a href="#">Text Search</a>	<a href="#">FTP</a>	<a href="#">NED Source List</a>
<a href="#">Advanced All-Sky</a>	<a href="#">Redshifts</a>	<a href="#">Knowledgebase</a> <small>CHANGES LEVEL 5</small>	<a href="#">X/Y offset to RA/DEC</a>	<a href="#">Team</a>
<a href="#">IAU Format</a>	<a href="#">Positions</a>	<a href="#">Abstracts</a>	<a href="#">Batch Job Submission</a> <small>Changed</small>	<a href="#">Comment</a>
<a href="#">By Refcode</a>	<a href="#">Notes</a>	<a href="#">Thesis Abstracts</a>	<a href="#">Pick Up Batch Job Results</a>	<a href="#">Web Links</a>
	<a href="#">Diameters</a>		<a href="#">Skyplot</a>	<a href="#">Glossary &amp; Lexicon</a>

Interface last updated: 12 Dec 2006

- \* 9.5 million objects
- \* 14.7 million multiwavelength object cross-IDs
- \* 188 thousand associations (candidate cross-IDs)
- \* 1.3 million redshifts
- \* 25.2 million photometric measurements

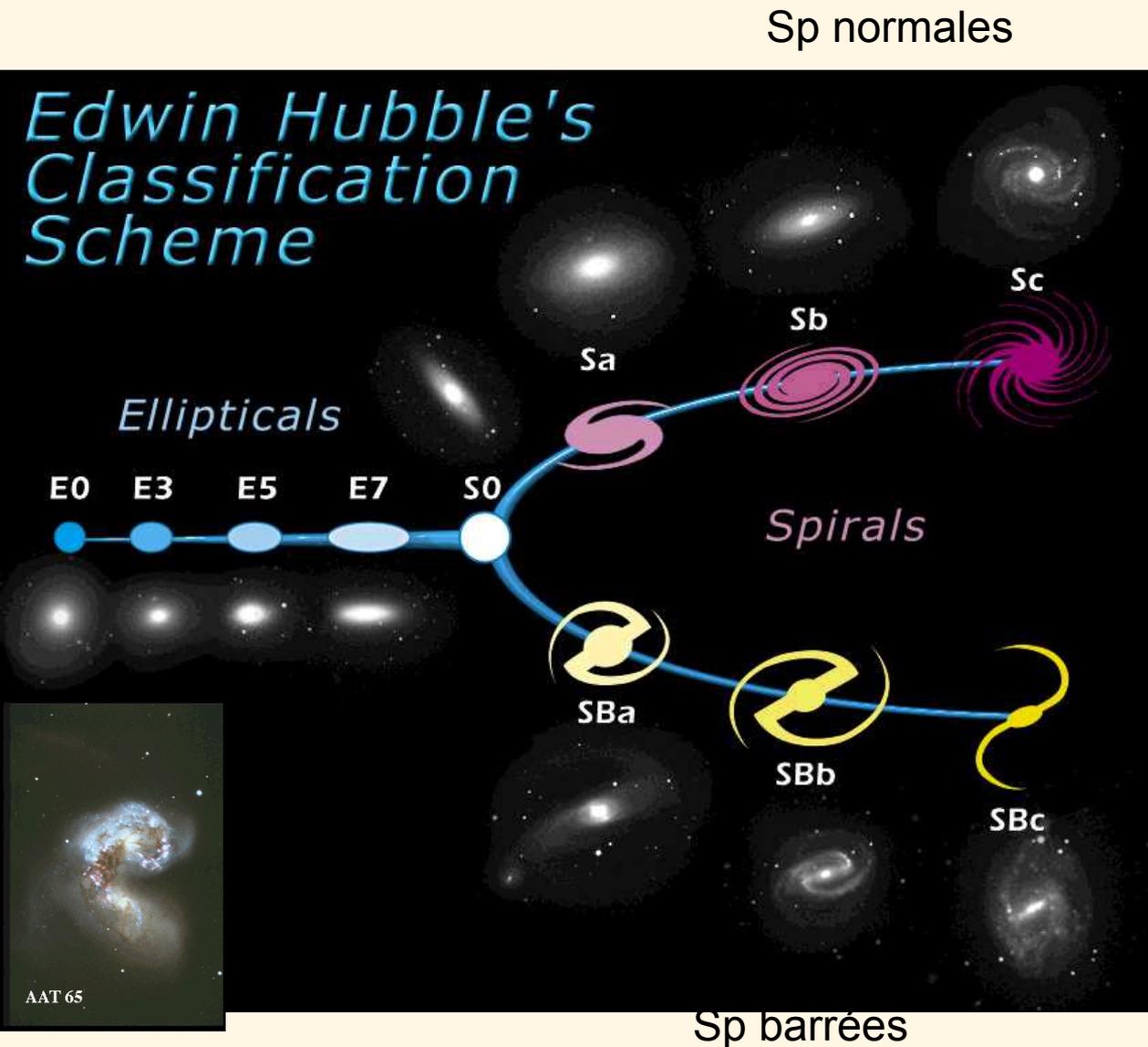
Database last updated: 12 Dec 2006

- \* 3.6 million diameter measurements
- \* 3.6 million objects linked to 65,000 refereed journal articles
- \* 2.3 million images, maps and external links
- \* 65 thousand notes
- \* 42 thousand abstracts

If your research benefits from the use of NED, we would appreciate the following acknowledgement in your paper: *This research has made use of the NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) which is operated by the Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, under contract with the National Aeronautics and Space Administration.*



# La séquence de Hubble



Sp normales

Hubble a classé les galaxies par type morphologique : la séquence de Hubble (The Realm of the Nebulae, 1936). Les spirales sont distinguées en fonction de la forme de leurs disques et de leurs bulbes.

A l'époque, Hubble pensait qu'il s'agissait d'un ordre chronologique: les galaxies naissent de type E0 puis deviennent des spirales au cours du temps.

Sp barrées

# Les 4 grandes familles de galaxies

***Distribution***

***en nombre:***

***en masse stellaire:***

(de Vaucouleurs 1963) (Fukugita, Hogan & Peebles 98)

Spirales

**61%**

**25%**

Elliptiques

**34%**

**73%**

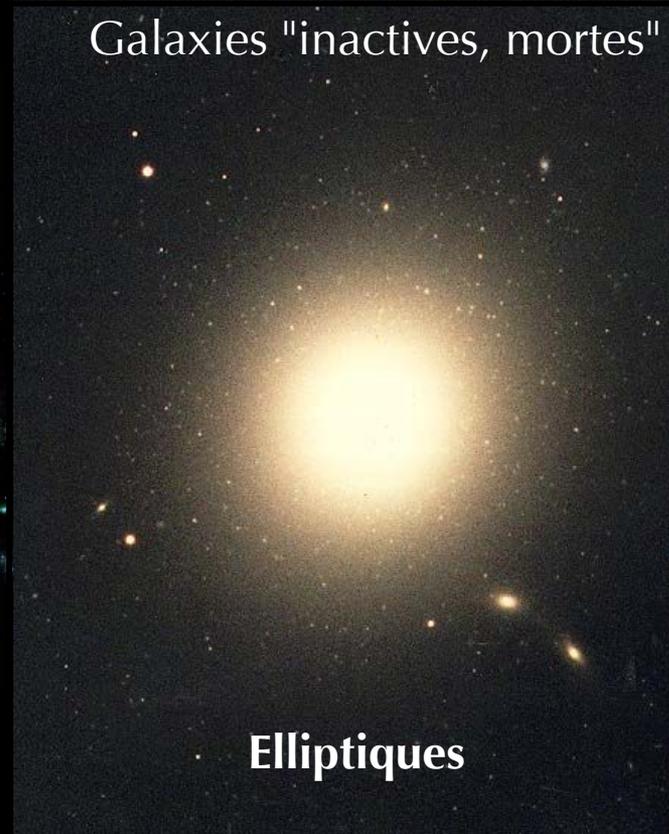
Irrégulières/Particulières

**5%**

**2%**



Galaxies "inactives, mortes"



Elliptiques



Irrégulières



Particulières