

# *ESTRUCTURA GALÁCTICA Y DINÁMICA ESTELAR*

## Introducción

<b>Estructura Galáctica</b>		<b>Dinámica Estelar</b>	
<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>8</b>	<b>Potenciales gravitacionales</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• “<i>Primvm Mobile</i>”</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• De perfiles de brillo a densidades</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El Grande Debate</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pares densidad-potencial</li> </ul>
<b>2</b>	<b>Cinemática Estelar</b>	<b>9</b>	<b>Órbitas y Resonancias</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recuentos y distribución de estrellas</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Órbitas en un plano</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Patrón Local de Reposo (<i>LSR</i>)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Epiciclos</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las constantes de Oort</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resonancias</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Curva de rotación de la Vía-Láctea</li> </ul>	<b>10</b>	<b>Importancia de las Colisiones y la E.B.A.</b>
<b>3</b>	<b>Componentes de la Vía-Láctea</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Encuentros</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El Halo</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ecuación de <i>Boltzmann –Vlasov</i> Acolisional</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los Discos (Grueso, Delgado, Extremo)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Momentos de la E.B.A.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El Bulbo (y la Barra)</li> </ul>	<b>11</b>	<b>E.B.A. Estacionaria</b>
<b>4</b>	<b>El Centro Galáctico</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Integrales de movimiento &amp; Teoremas de Jeans</li> </ul>
<b>5</b>	<b>Cúmulos de Estrellas</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Función Distribución para Sistemas Esféricos</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propiedades (CMD, edades, metalicidades, perfil)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Función Distribución para Sistemas Axi-simétricos</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dinámica y evolución (mecanismos de disolución)</li> </ul>	<b>12</b>	<b>Estabilidad de sistemas estelares acolisionales</b>
<b>6</b>	<b>El Medio Interestelar</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teoría de perturbaciones (analogía con fluidos)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contenido (radiación, gas, polvo y rayos-cósmicos)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Respuesta de sistemas esferoidales y discoidales</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estructura y fases</li> </ul>	<b>13</b>	<b>Dinámica de Discos y Estructura Espiral</b>
<b>7</b>	<b>Evolución de la Vía-Láctea</b>	<b>14</b>	<b>Encuentros y fusiones</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escenarios clásicos (monolítico × jerárquico)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aproximaciones tratables analíticamente</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelos de Evolución Química</li> </ul>	<b>15</b>	<b>Termodinámica de Sistemas Gravitacionales</b>

## Referencias bibliográficas

- *Galactic Astronomy*. J. Binney & M. Merrifield, 1998.  
Princeton Series in Astrophysics, Princeton Univ. Press.
  - ★ *Galactic Dynamics*. J. Binney & S. Tremaine, 1987.  
Princeton Series in Astrophysics, Princeton Univ. Press.
  - *Galactic Astronomy*. D. Mihalas, 1968. Freeman.
- 
- ★ *Principles of Astrophysics (Using Gravity and Stellar Physics to Explore the Cosmos)*. C. Keeton, 2014. Springer.
  - *Extragalactic Astronomy & Cosmology (An Introduction)*. P. Schneider, 2006. Springer.
- 
- *Galaxies in the Universe (An Introduction)*. L. Sparke & S. Gallagher, 2000. Cambridge Univ. Press.
  - *The Milky Way as a Galaxy*. G. Gilmore, I.R. King & P.C. van der Kruit, 1989. Genova Observatory.
  - *An Introduction to Distance Measurement in Astronomy*. R de Grijs, 2011. Wiley.
  - *The Making of History's Greatest Star Map*. M. Perryman, 2010. Springer.

Undergraduate Lecture Notes in Physics

Charles Keeton

# Principles of Astrophysics

Using Gravity and Stellar Physics to Explore the Cosmos



Springer

James Binney and Scott Tremaine

# GALACTIC DYNAMICS

Second Edition

PRINCETON SERIES IN ASTROPHYSICS

# El curso de Estructura Galáctica y Dinámica Estelar

**Horario:** Lunes, Martes y Miércoles, 16-18h

*Aula:* sala de videoconferencias / salón de clases del Posgrado

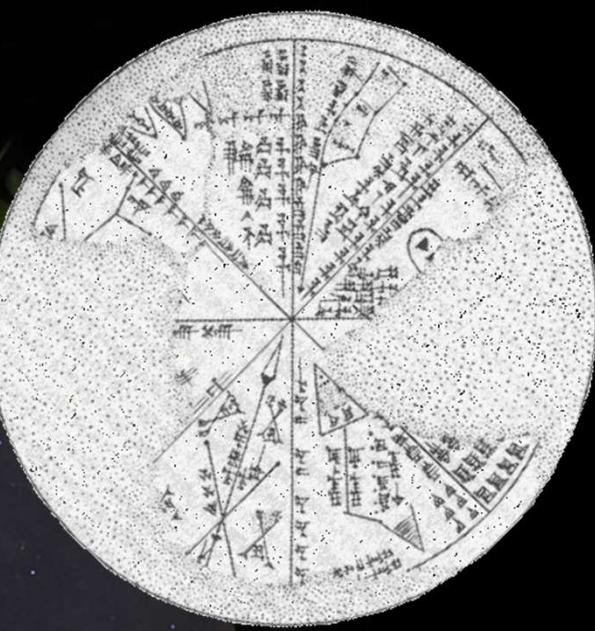
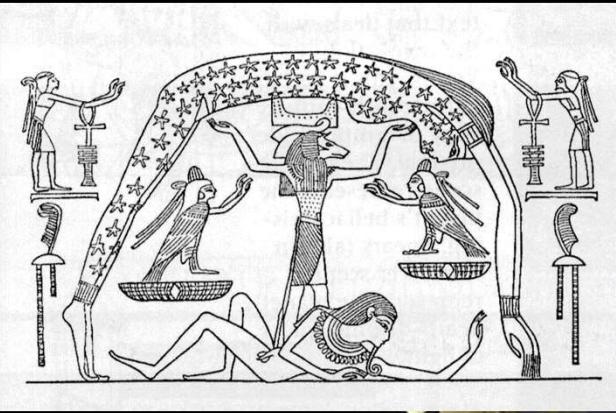
*Notas de Aula:* estarán disponibles por correo electrónico

*Dudas:* César A. Caretta

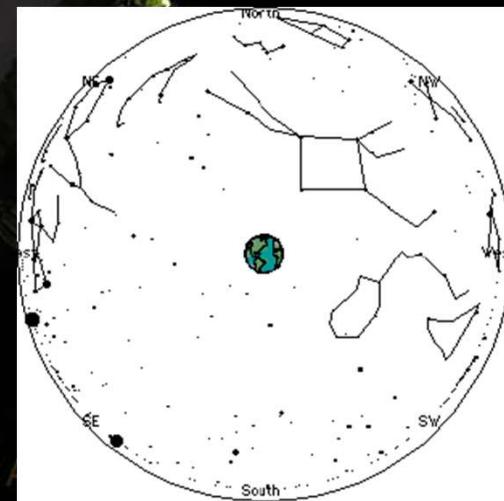
(c.augusto@ugto.mx, [473] 105-7593)

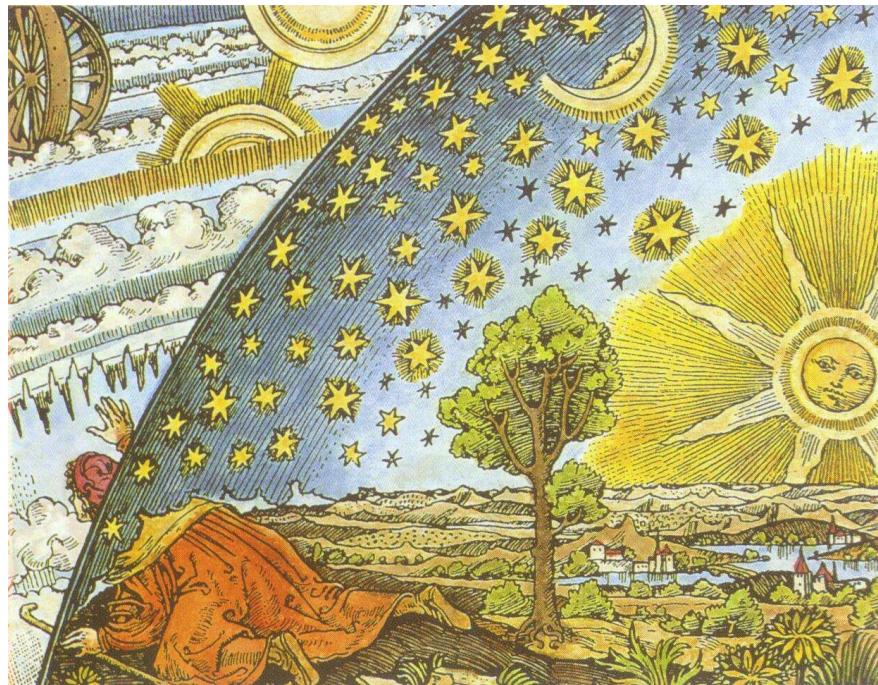
Departamento de Astronomía, DCNE (Campus Guanajuato), UG

[www.astro.ugto.mx](http://www.astro.ugto.mx), [473] 732-9607, 732-9548 (extensión 2522);

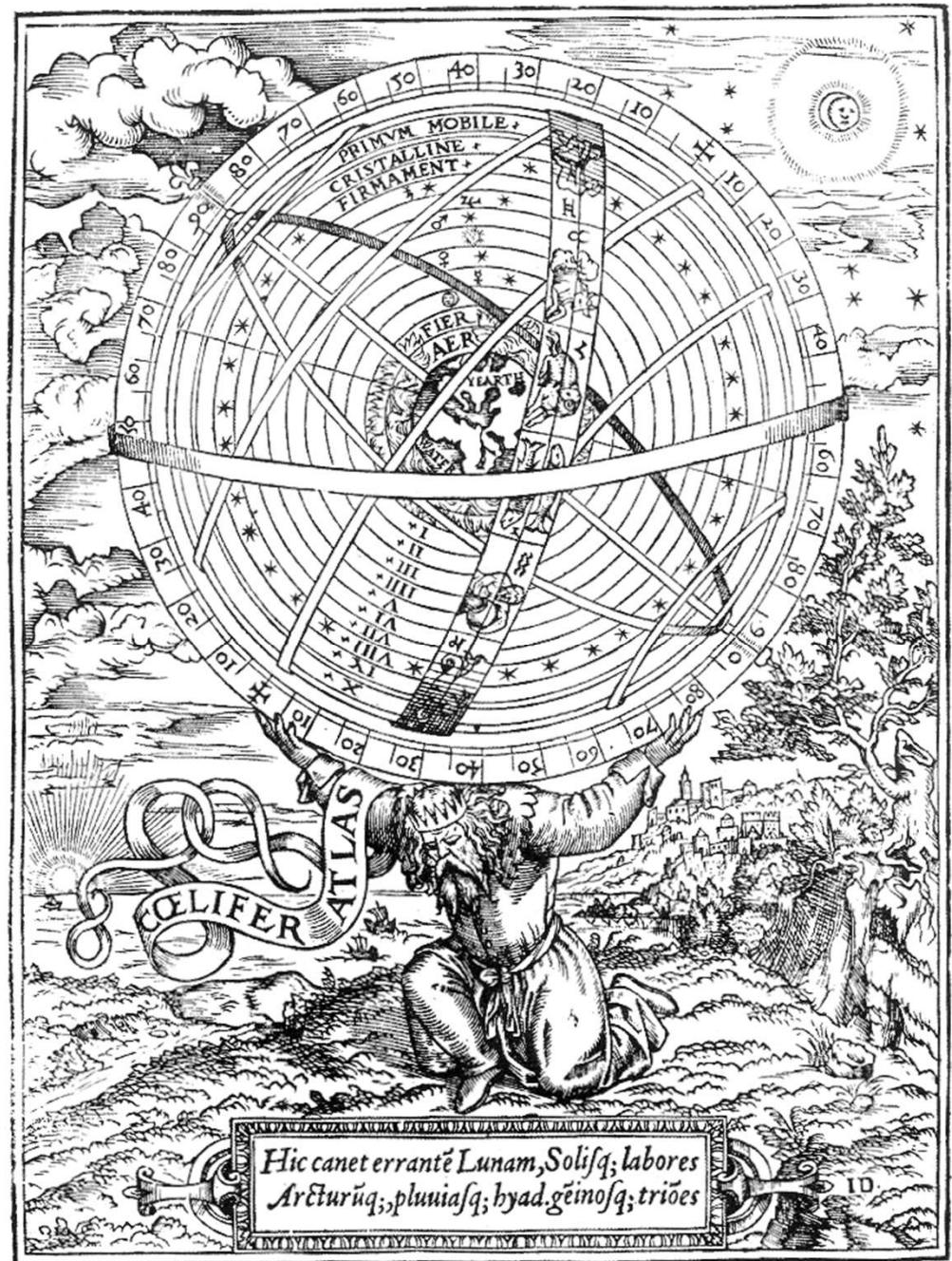


# *Primvm Mobile*





## La Esfera Fija de Estrellas

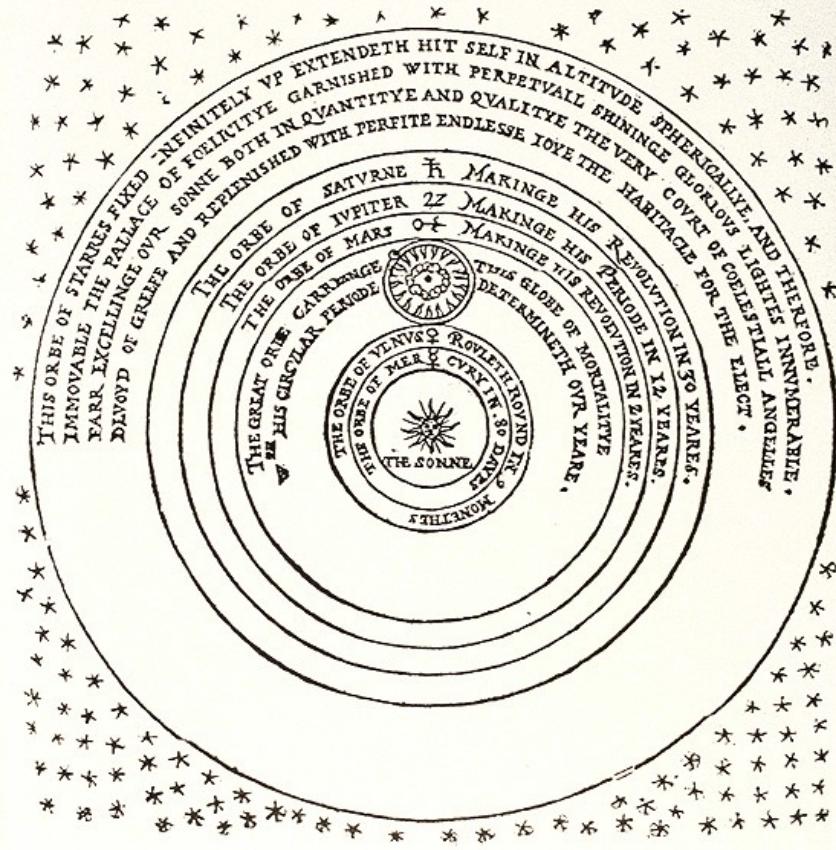


- La Física Aristotélica de los 5 elementos

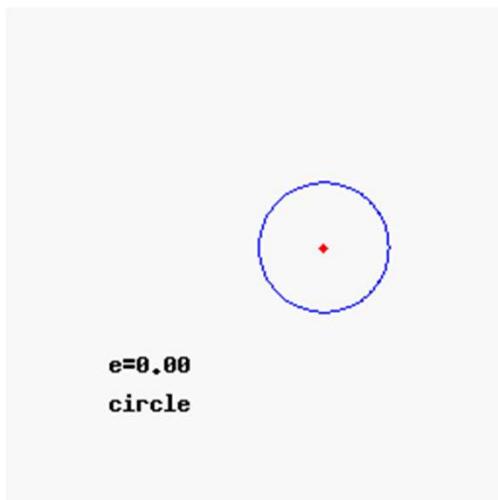


- La recopilación de Tolomeo y la Edad Media

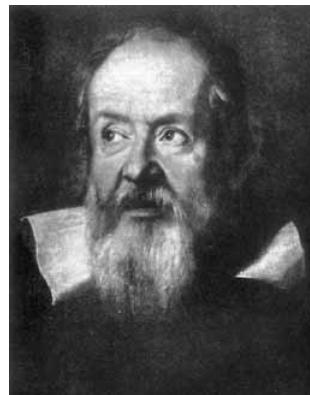
A perfitt description of the Coelestiall Orbies,  
according to the most auncient doctrine of the  
Pythagoreans, &c.



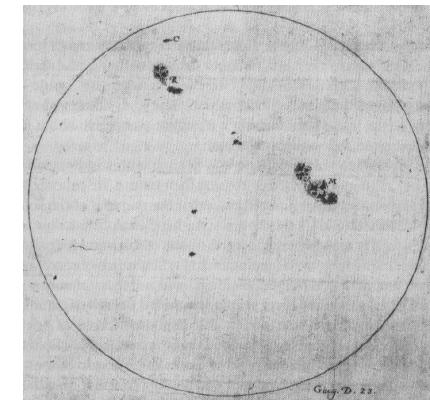
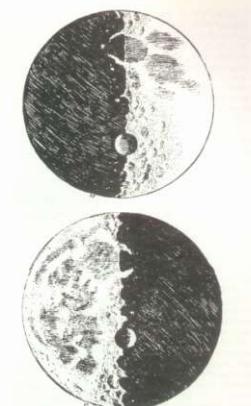
• Thomas Digges (1576)



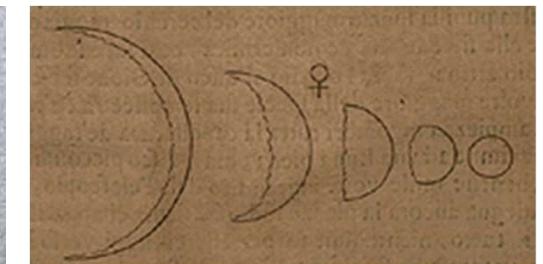
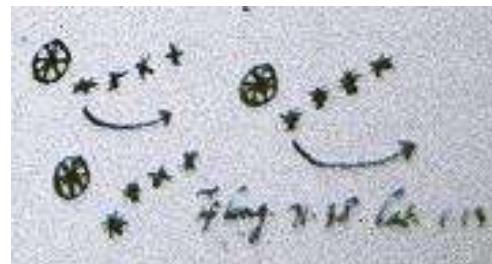
• Johannes Kepler  
(1605)

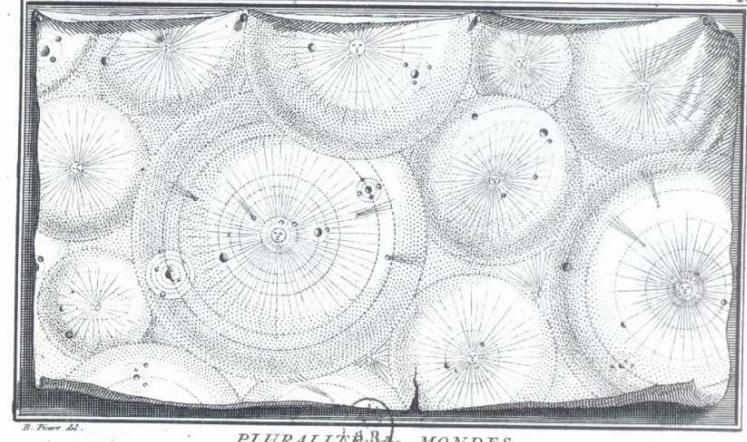


Se rompe la perfección



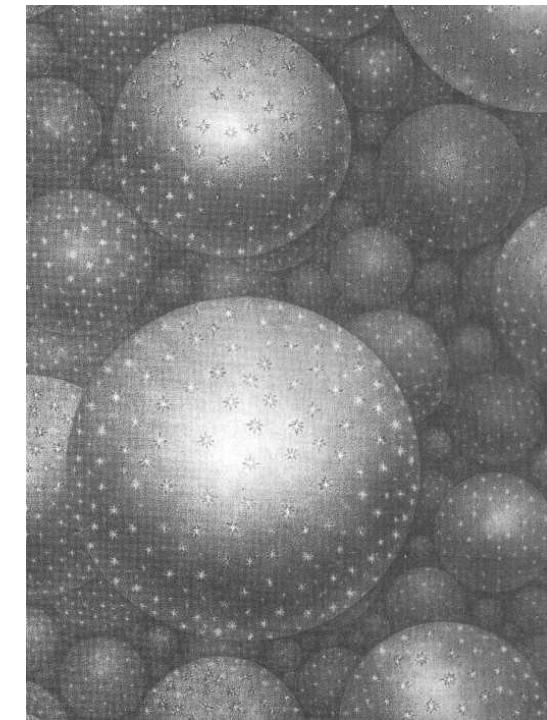
• Galileo Galilei y el telescopio (1609)





## Hipótesis Filosóficas

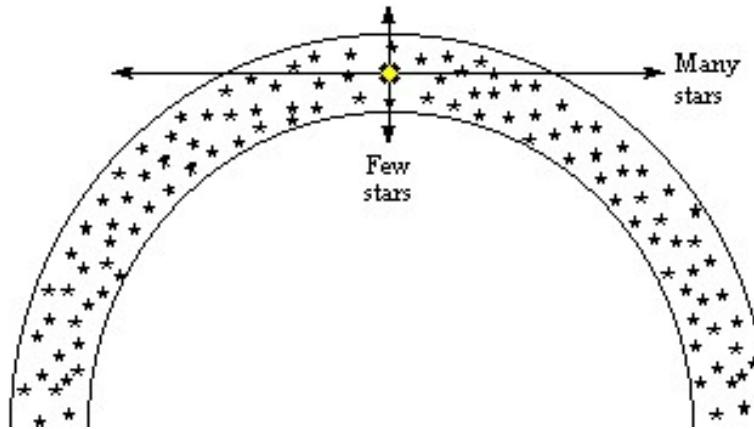
- 1584 – **Giordano Bruno**: el Universo es infinito y lleno de estrellas, como el Sol, rodeadas de planetas  
*“De l’infinito universo e mondi”*



- 1750 – **Thomas Wright**: las estrellas están distribuidas en capas esféricas (la Vía-Láctea es una de ellas)

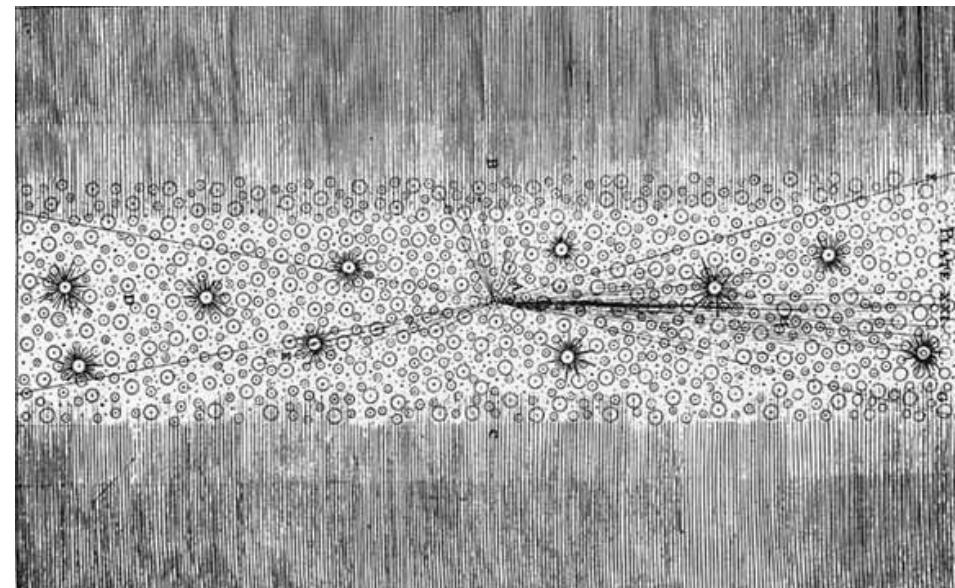
Wright's Milky Way (1750)

*“An Original Theory or New Hypothesis of the Universe”*

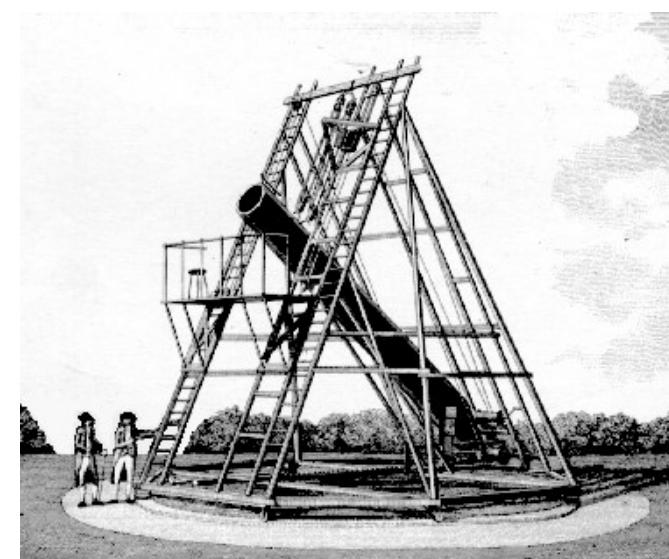
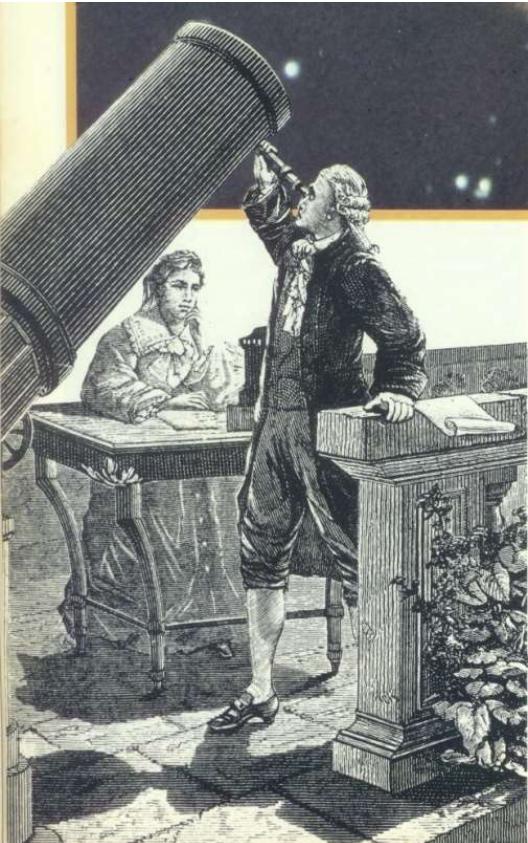


- 1755 – **Immanuel Kant**: los objetos celestes difusos (nebulosas) son “universos-isla”, similares a la Vía-Láctea, la cual tiene forma plana por rotación

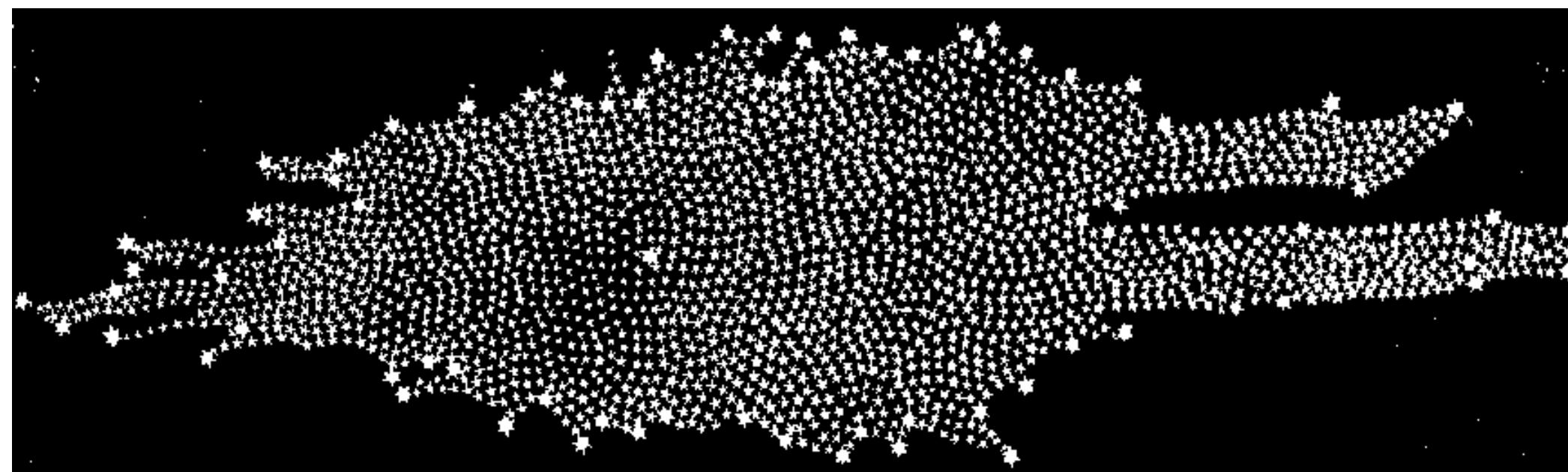
*“Allgemeine Naturgeschichte und Theorie Des Himmels”*



## El primero modelo observational



- 1785 – **Wilhelm y Caroline Herschel:** conteo de estrellas en 683 regiones (*Modelo de Herschel*), suponiendo:
  - que tienen mismo brillo intrínseco
  - que él podía ver estrellas hasta el límite del sistema



## Siglos XIX y XX

- 1832 – Thomas Henderson: mide la paralaje de  $\alpha$ Cent (F. Bessel anuncio la paralaje de 61Cyg en 1838)
- 1864 – William Huggins: primeras observaciones espectroscópicas de nebulosas (NGC6543: 3 lines: H, N and “nebulium” = OIII)
- 1880 – H. Draper: primeras placas fotográficas (Nebulosa de Orión)

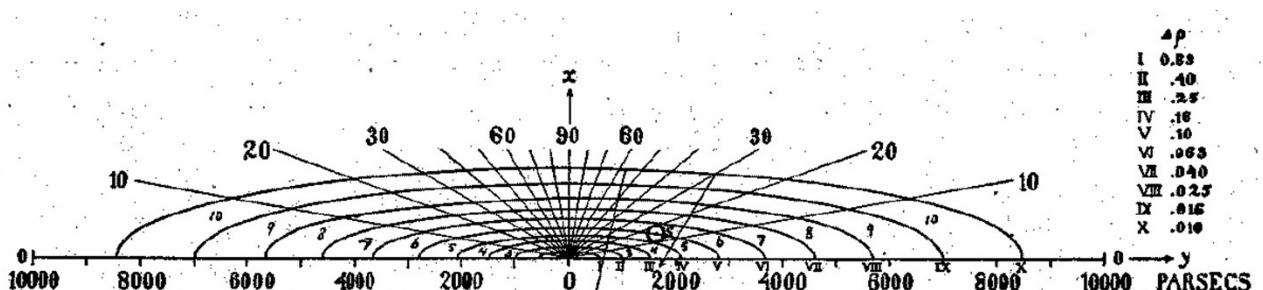
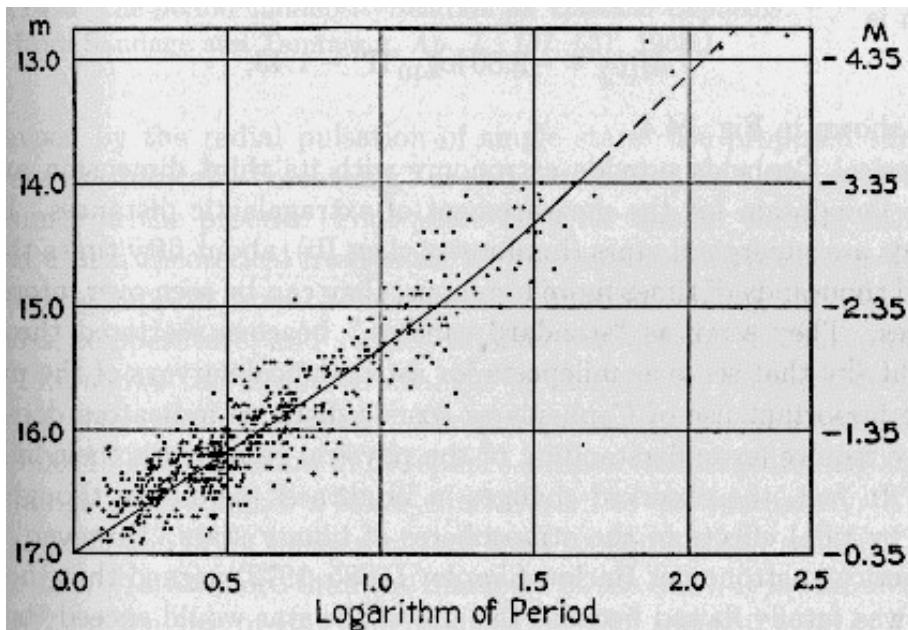


FIG. I

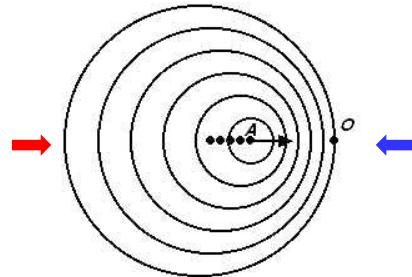
- 1906-1922 – Jacobus C. Kapteyn: proyecto internacional para **reconteo de estrellas** estrellas en 206 zonas:  
 $[a, b, \Theta] = [8.5, 1.7, 0.65 \times 0.04]$  kpc  
(*Modelo de Kapteyn*)



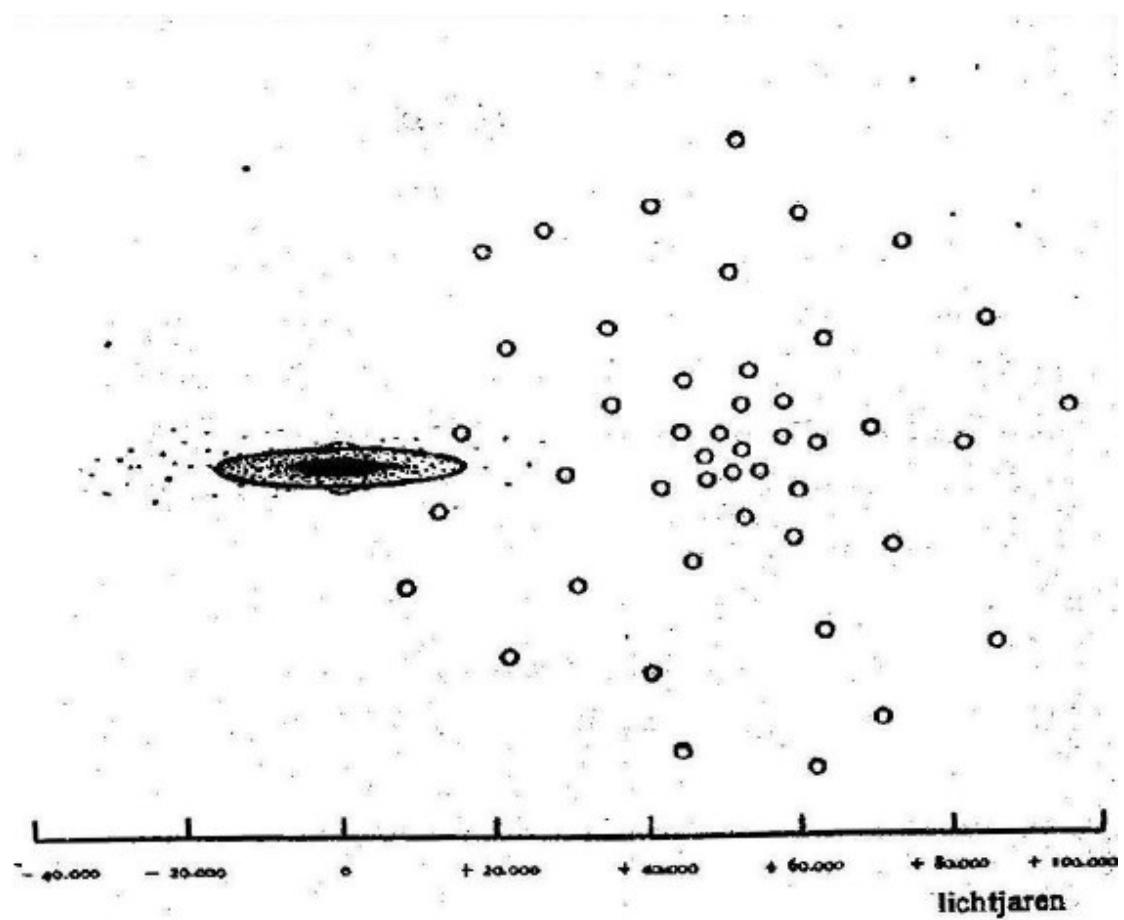
- 1912 – Henrietta S. Leavitt : descubrió la relación periodo-luminosidad (**Ley de Leavitt**) para las variables Cefeidas (P. Nube de Magallanes)

## Siglos XIX y XX

- 1912-1917 – Vesto M. Slipher: mide velocidades radiales de nebulosas espirales



1913 – 4 (*3 redshifts*, M31 blueshift)  
1914 – 12 (*11 redshifts*, M31 blueshift)  
1925 – 43 (*41 redshifts*, 2 blueshifts)



- 1918 – Harlow Shapley:  
distribución espacial de  
los Cúmulos Globulares:  
 $[R, \Theta] = [50, 15-20]$  kpc  
(*Modelo de Shapley*)

- 1916-1923 – Adriaan van Maanen :  
reportó la detección de “rotación de alta velocidad” ( $T \sim 10^5$  yrs)  
en M33 y M101 (no confirmadas después)

# El Grande Debate

- 1920 – el Grande Debate [Nac. Academy of Science, USA]

Visiones opuestas en 2 cuestiones fundamentales {

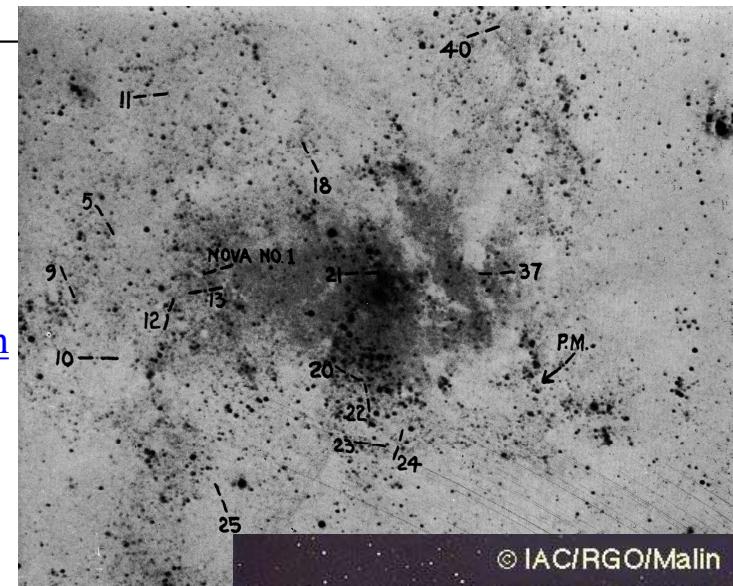
- el tamaño de la VL
- la existencia de otras galaxias



## Harlow Shapley: conferencia y artículo (1921)

Las nebulosas espirales son miembros de la “Grande Galaxia”

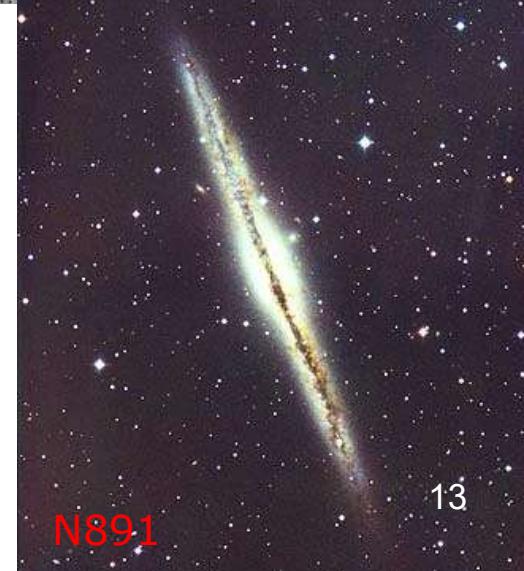
- cúmulos globulares** – caracterizan la estructura de la VL
- la VL tiene menor brillo superficial que las espirales
- las estrellas de la VL son mas rojas que las de espirales
- (super)novæ de 1885 en M31 – muy brillante para ser extragal.
- la rotación de espirales ([van Maanen](#)) tendría velocidades supra lumínicas si fueron objetos extragalácticos



## Herbert Curti: conferencia y artículo (1921)

Las nebulosas espirales son “universos-isla”, como la Vía-Láctea

- modelo de [Kapteyn](#) – las distancias de Shapley son sobreestimadas
- todas novæ en espirales son más débiles que en la VL [M31  $\sim 100$  kpc]
- nebulosas espirales evitan el plano de la VL** (J. Herschel)
- los  $\varnothing$  de espirales presentan un largo rango angular (rango largo de dist.)
- con las grandes vel. radiales ([Slipher](#)), las espirales huirían de la VL
- espirales de canto presentan un banda oscura, como la VL



# La resolución del Debate

- 1925-1929 – **Edwin Hubble y M. Humason:** midieron las **distancias** de N6822, M33 y M31 [300 kpc] usando Cefeidas
- 1929 – E. Hubble: *Ley de Hubble-Lemaître* (expansión del Universo)  
$$\mathbf{v} = H_0 \mathbf{D}$$

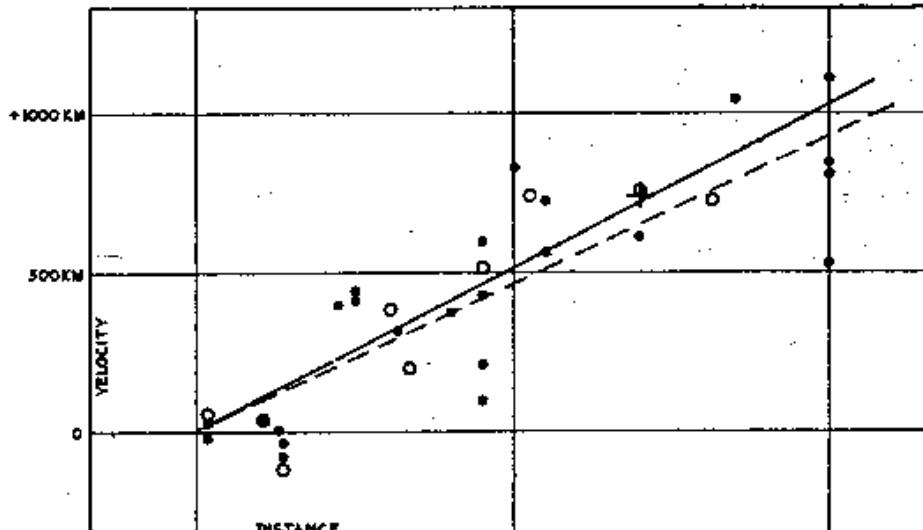
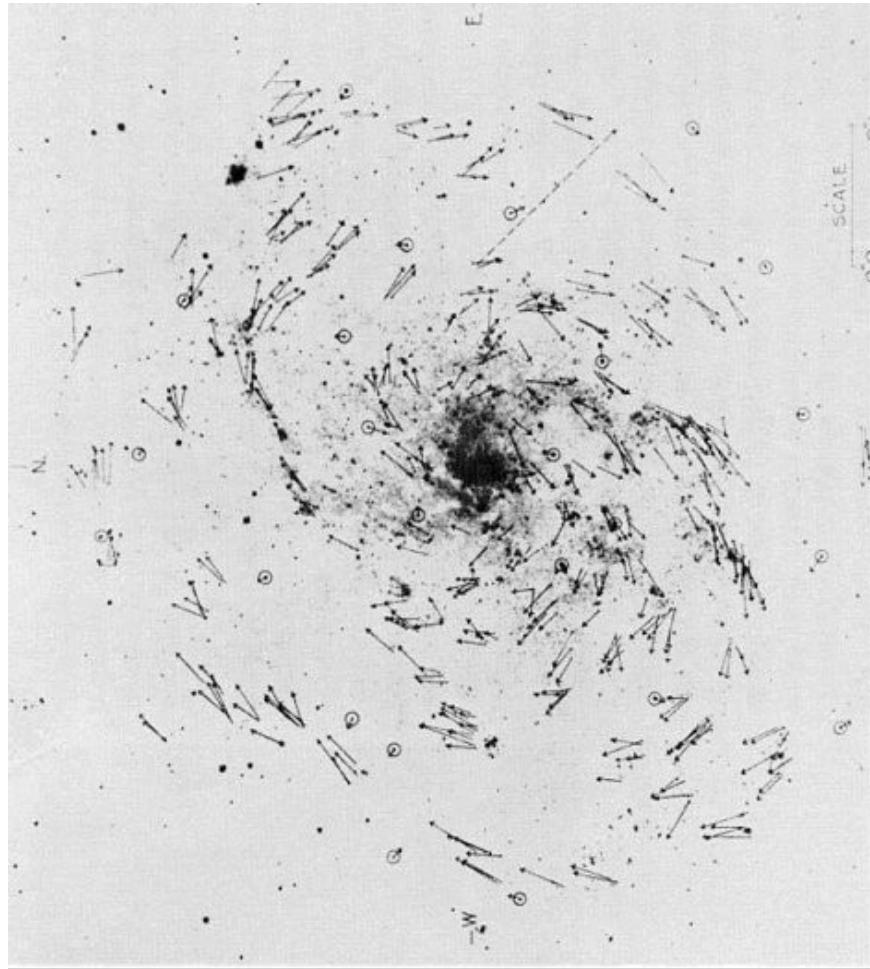


FIGURE 1

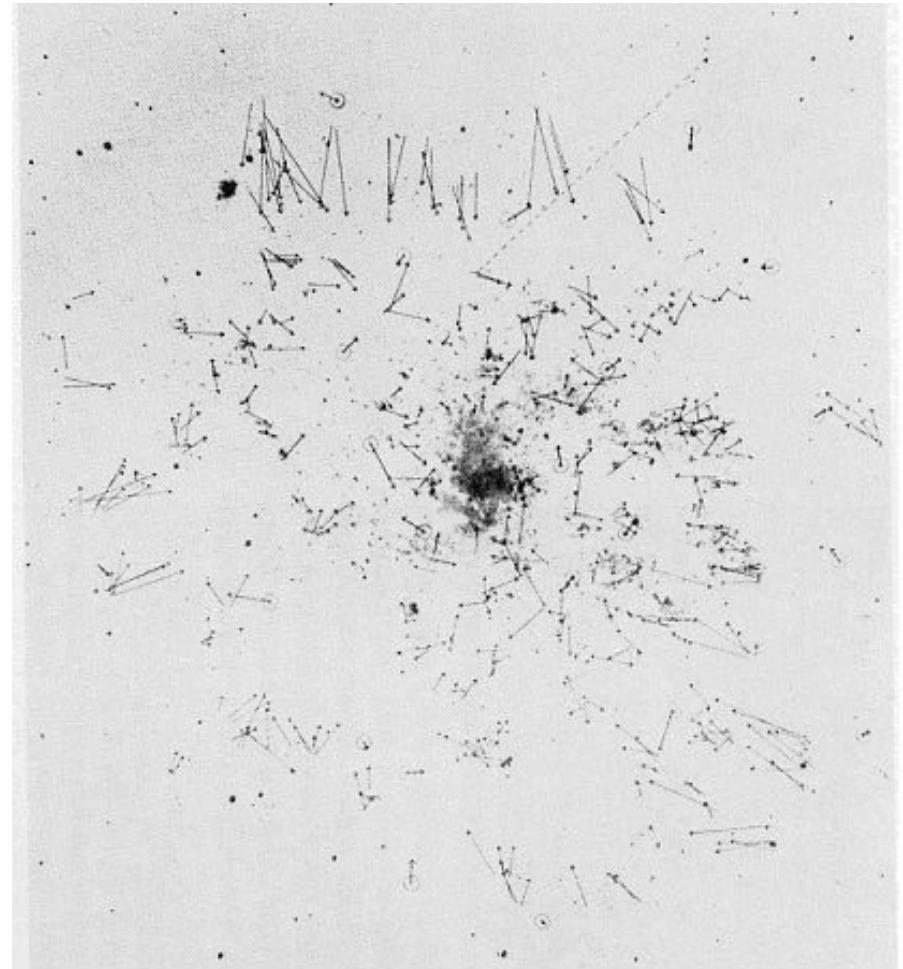


- 1936 – E. Hubble: “*The Realm of Nebulæ*”

# La rotación de van Maanen



• A. van Maanen

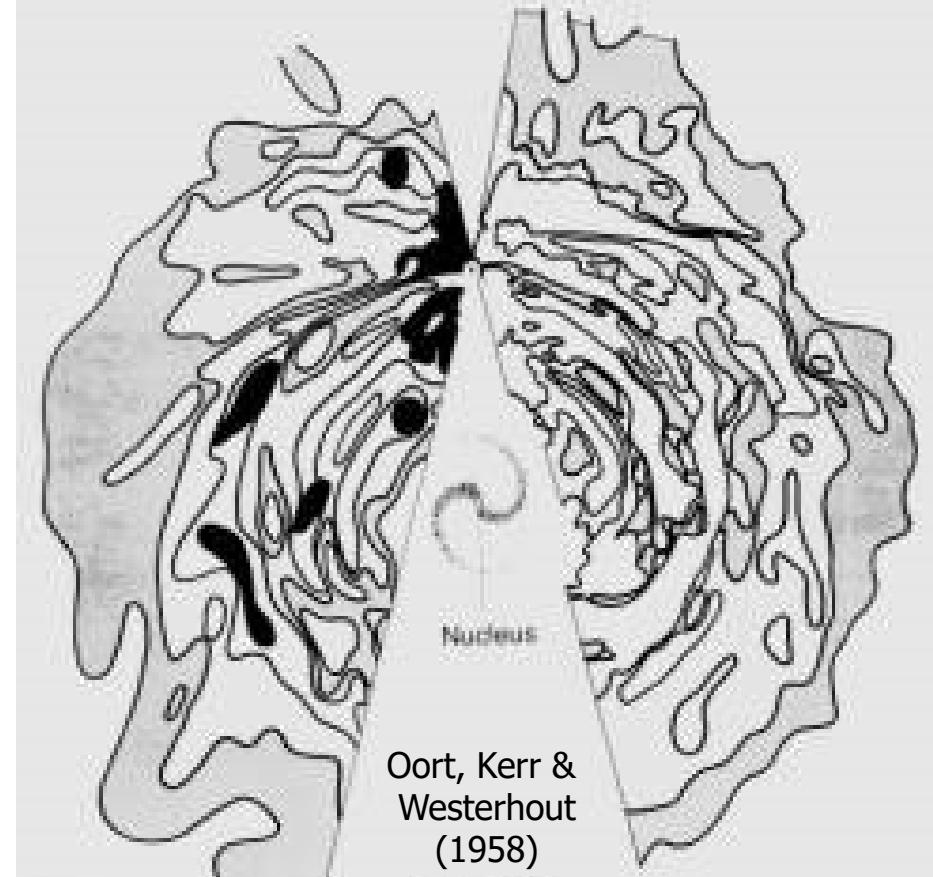


• Lundmark

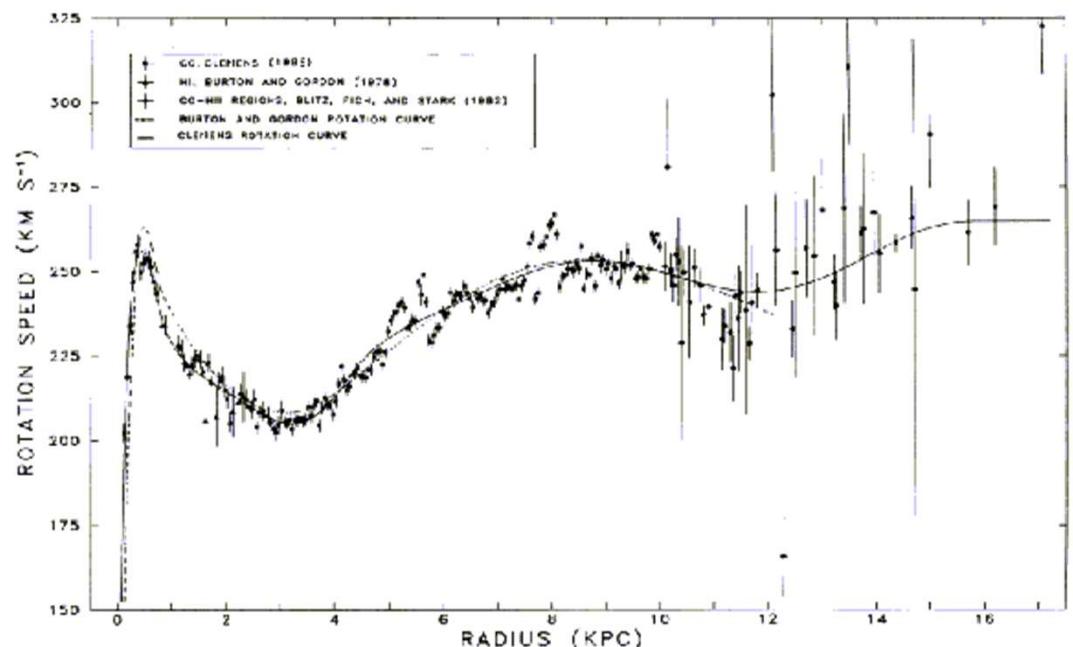
- 1911-1913 – **E. Hertzprung y H.R. Russell**: diagrama Color-Magnitud
- 1927 – **B. Lindblad**: primero modelo cinemático (con subsistemas)
- 1928 – **Jan Oort**: primera teoría completa de cinemática estelar

# El polvo, el gas y las poblaciones estelares

- 1930 – **R.J.Trumpler**: mediciones de la **extinción galáctica** por el estudio de cúmulos abiertos



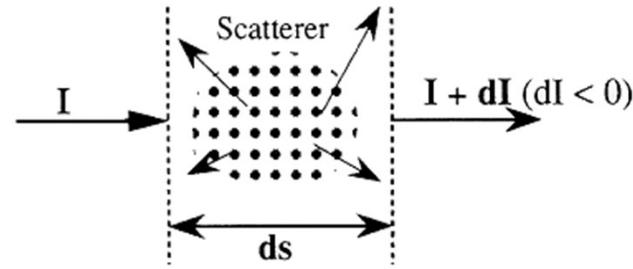
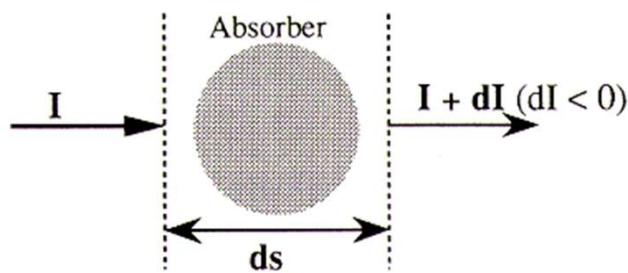
- 1932 – **Karl Jansky**: ¡la VL emite en radio!
- 1944 – **van de Hulst**: predicción de la **línea de 21 cm** (observada en 1951)
- 1944 – **Walter Baade**: **poblaciones estelares**  
(I – azules y jóvenes, con polvo y gas;  
II – rojas y viejas, sin polvo ni gas)



- 1970 – curva de rotación de la galaxia:  
halo de **materia oscura**

# EXTINCIÓN INTERESTELAR

## Absorción y dispersión de la luz



★ libre camino promedio

$$n = N/V = 1/\sigma\ell \Rightarrow \ell = 1/n\sigma$$

★ opacidad

$$dI_\lambda \propto \rho I_\lambda ds$$

$$dI_\lambda = -\kappa_\lambda \rho I_\lambda ds$$

★ profundidad óptica

$$dI_\lambda = -I_\lambda d\tau_\lambda$$

$$d\tau_\lambda = \kappa_\lambda \rho ds$$

$$dI_\lambda / I_\lambda = -d\tau_\lambda \Rightarrow I_\lambda = I_{\lambda 0} \exp(-\tau_\lambda)$$

$\sigma$  = sección de choque

$\ell$  = libre camino promedio

$I_\lambda$  = intensidad del haz

$\rho$  = densidad del medio

$s$  = longitud del medio

$\kappa_\lambda$  = opacidad (coeficiente de absorción)

$\tau_\lambda$  = profundidad óptica

$[m^2 kg^{-1}]$

[adim.]

$\tau_\lambda \gg 1$ , medio ópticamente grueso

$\tau_\lambda \ll 1$ , medio ópticamente delgado

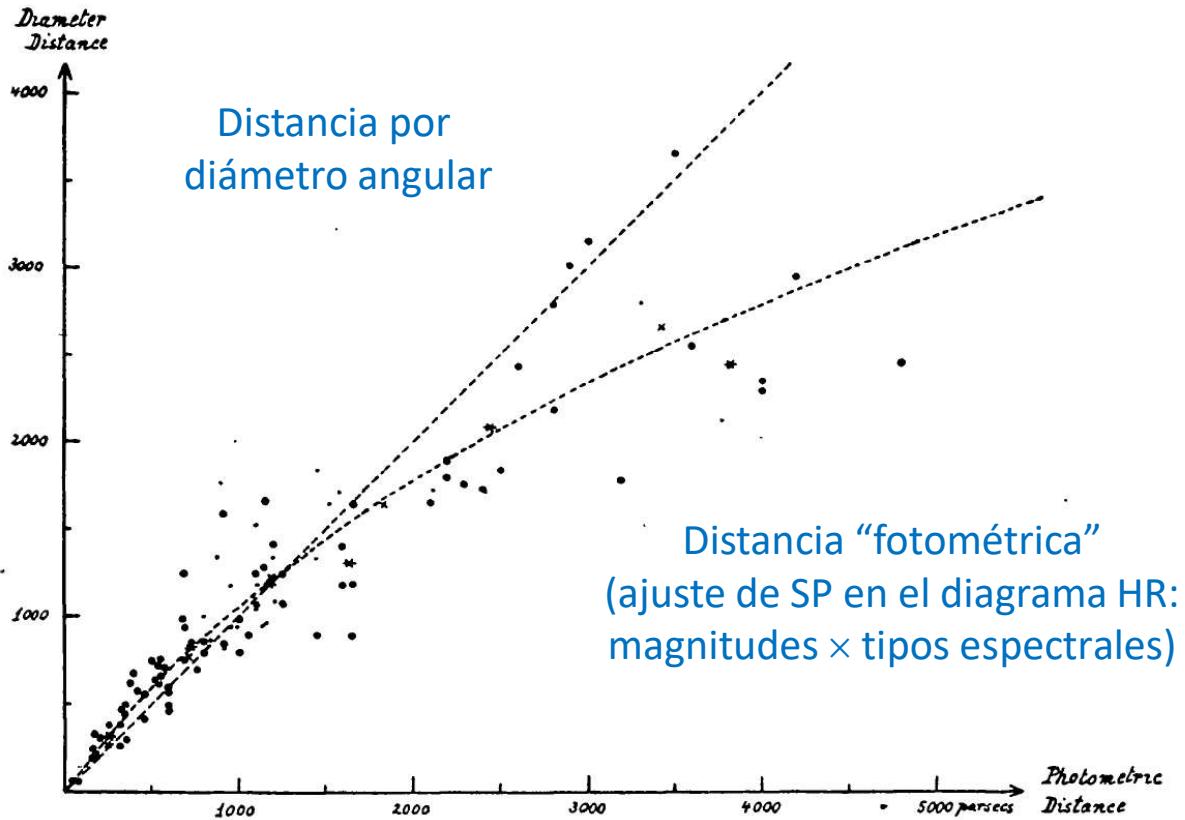
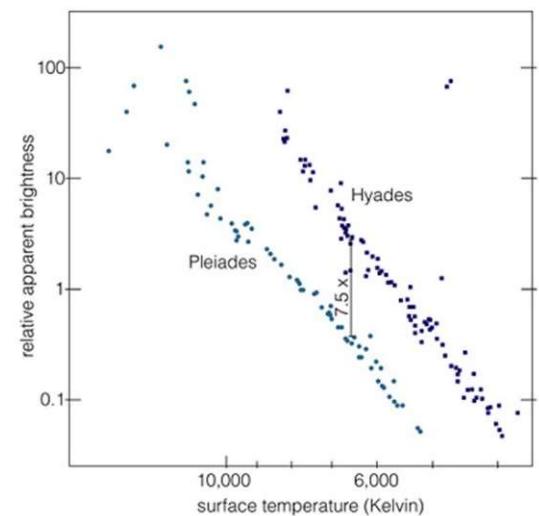


FIG. 1.—Comparison of the distances of 100 open star clusters determined from apparent magnitudes and spectral types (abscissae) with those determined from angular diameters (ordinates). The large dots refer to clusters with well-determined photometric distances, the small dots to clusters with less certain data (half weight). The asterisks and crosses represent group means. If no general space absorption were present, the clusters should fall along the dotted straight line; the dotted curve gives the relation between the two distance measures for a general absorption of 0<sup>m</sup>7 per 1000 parsecs.

## CÚMULOS ABIERTOS



Trumpler, R.J. (1930), PASP 42, 214.

## Extinción interestelar

Tanto la **absorción** de la radiación como su **dispersión (scattering)** por partículas del medio interestelar (MIS) generan una **disminución del flujo**<sup>▽</sup> recibido en la Tierra y, por lo tanto, un aumento en las magnitudes. Esos efectos, agrupados en lo que llamamos **extinción interestelar**, dependen básicamente de la *distancia*, la *dirección en el cielo* y la *longitud de onda*.

Llamamos **opacidad**,  $\kappa_\lambda$  (medida en  $\text{m}^{-1} \text{kg}^{-1}$ ), a la falta de transparencia de un medio (de densidad  $\rho$  y dimensión  $ds$ ):

$$dI_\lambda \propto I_\lambda \rho ds = -\kappa_\lambda I_\lambda \rho ds$$

Definiendo:

$$d\tau_\lambda \equiv -\kappa_\lambda \rho ds$$

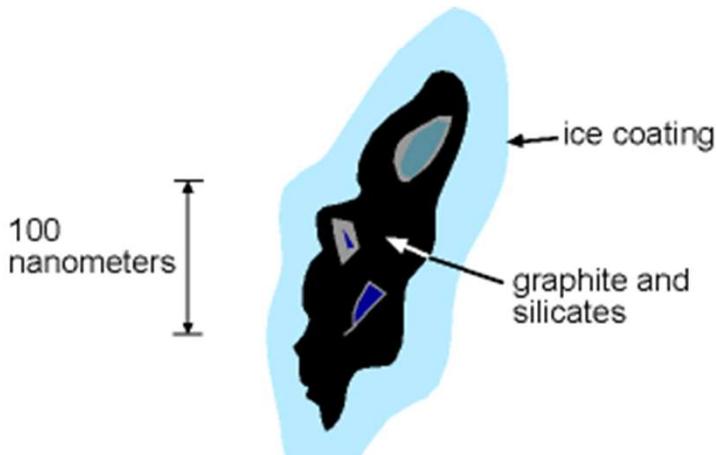
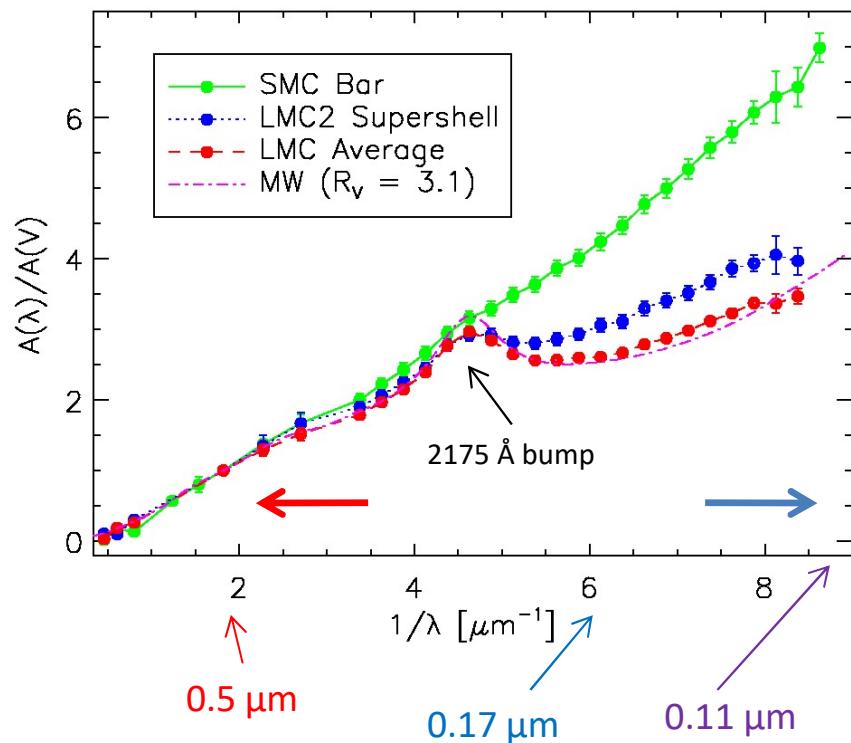
como la **profundidad óptica** (adimensional) de ese medio, tenemos:

$$\frac{dI_\lambda}{I_\lambda} = d\ln(I_\lambda) = d\tau_\lambda \quad \Rightarrow \quad \ln\left(\frac{I_{\lambda,0}}{I_\lambda}\right) = \tau_\lambda \quad \therefore \quad I_\lambda = I_{\lambda,0} e^{-\tau_\lambda}$$

de forma que un medio con  $\tau_\lambda > 1$  es llamado ópticamente “**grueso**” mientras un medio con  $\tau_\lambda \ll 1$  es ópticamente “**delgado**”.

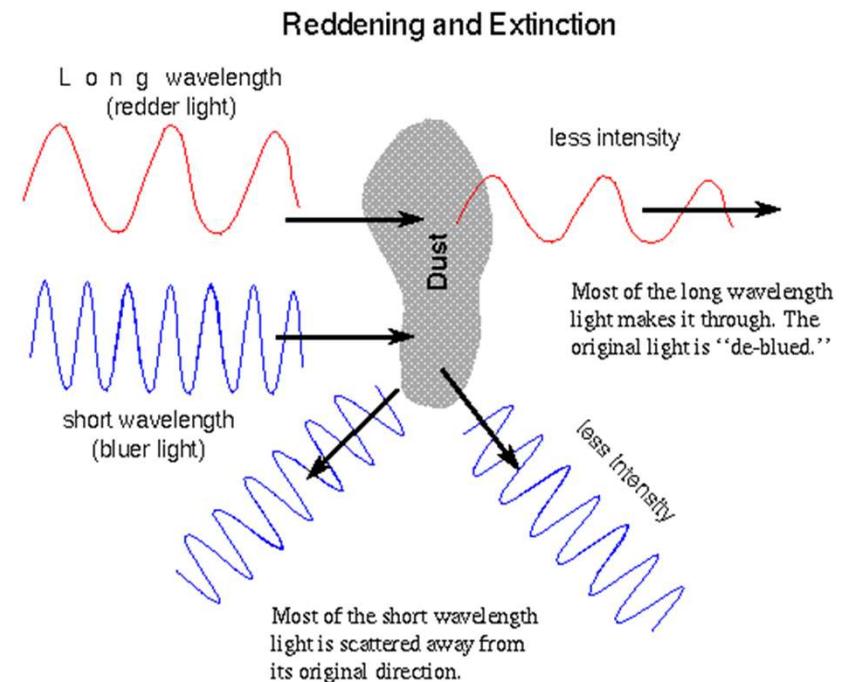
---

<sup>▽</sup> Aunque la radiación absorbida, en condiciones de equilibrio, va a ser re-emitida después, esa emisión se da normalmente en otras longitudes de onda fuera de la banda considerada. La dispersión, por su turno, desvía la luz de la línea de visión (LOS).

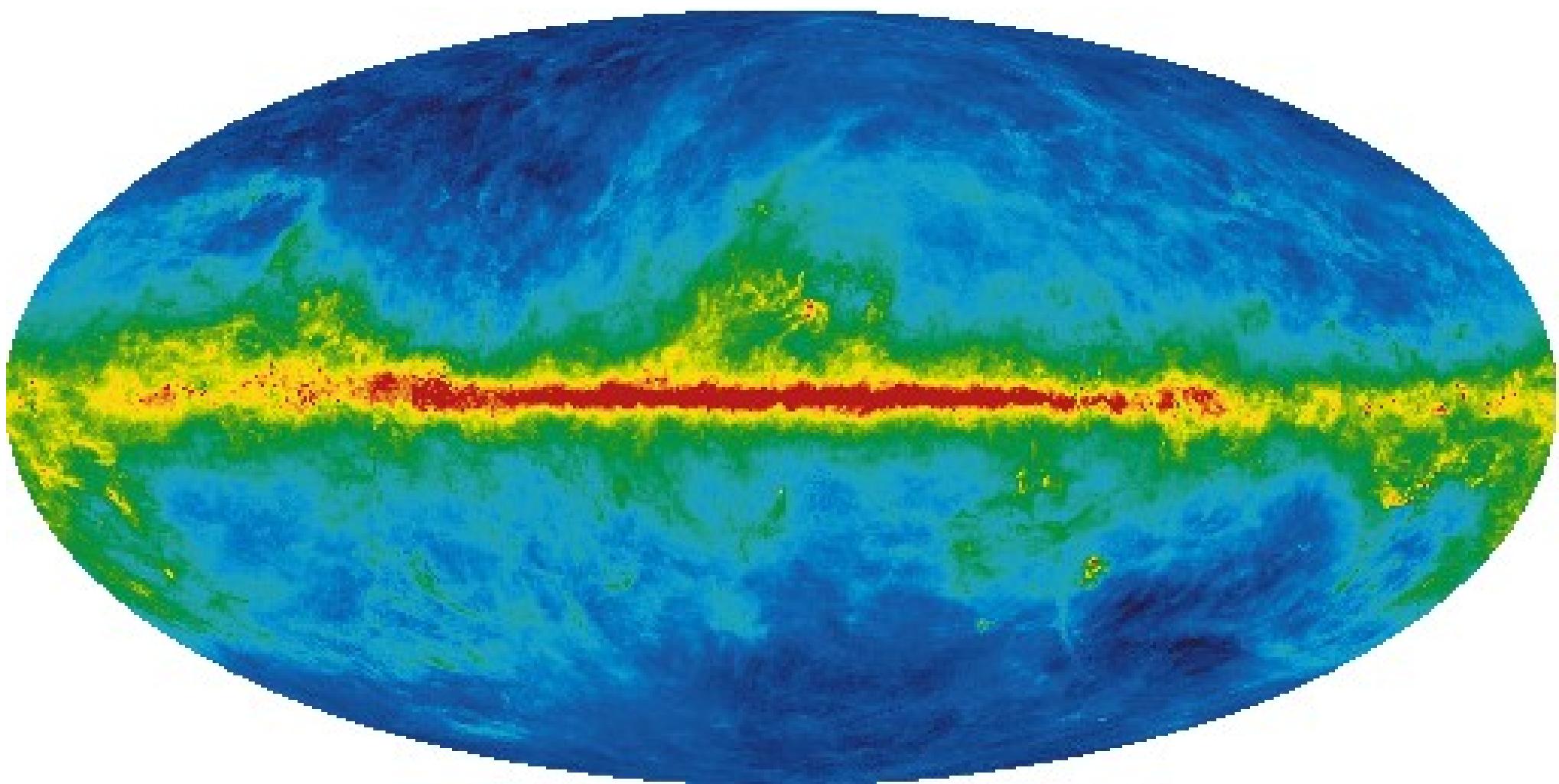


A typical dust grain (note the tiny scale!).

Dependencia con la longitud de onda



## Dependencia de la dirección



Para relacionar la **profundidad óptica** a las **magnitudes** hacemos lo siguiente:

$$\begin{aligned} L = L_0 e^{-\tau} & \quad L = 4\pi r^2 F & \rightarrow \text{Flujo a una distancia } r \\ & \quad L_0 = 4\pi R^2 F_0 & \rightarrow \text{Flujo, p.e., en la superficie de la estrella} \\ & & (R \text{ es el radio de la estrella}) \\ \therefore \frac{F}{F_0} &= \frac{R^2}{r^2} \frac{L}{L_0} = \frac{R^2}{r^2} e^{-\tau} \end{aligned}$$

Tomamos ahora  $R$  como siendo los 10 pc del modulo de distancia:

$$m - M = -2.5 \log_{10} \left( \frac{F}{F_0} \right) = -2.5 \left[ 2 \log_{10} \left( \frac{10}{r} \right) - \tau \log_{10}(e) \right]$$

$$m - M = 5 \log_{10}(r) - 5 + 2.5 \log_{10}(e) \tau = 5 \log_{10}(r) - 5 + A$$

$$\therefore A_\lambda = 2.5 \log_{10}(e) \tau_\lambda \approx 1.086 \tau_\lambda$$

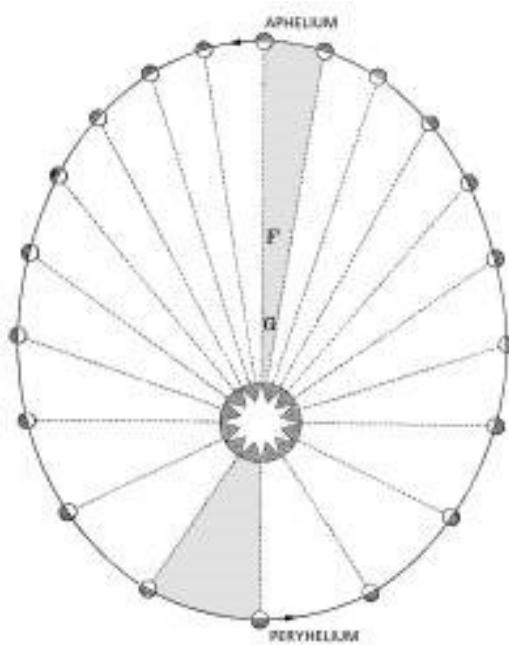
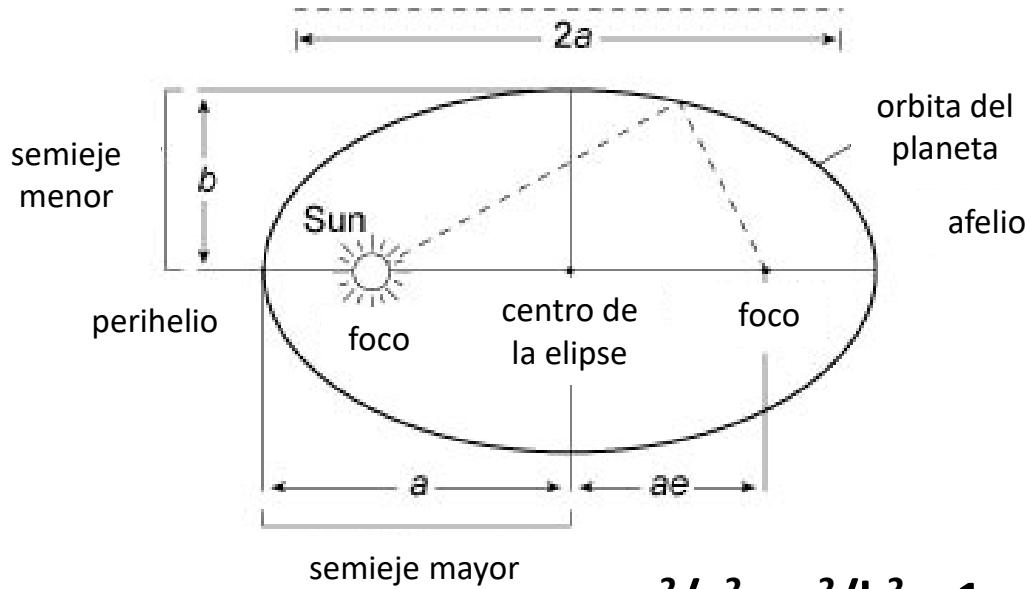
En la vecindad solar, la extinción interestelar en la banda V es típicamente de 1.8 mag/kpc

## Tarea 1:

### A) Lectura:

- 2014, P.C. van der Kruit. “*Lessons from the Milky Way: The Kapteyn Universe*” [arXiv 1407.2632]
- 1995, V. Trimble. “*The 1920 Shapley-Curtis Discussion: Background, Issues, and Aftermath*” [PASP 107, 1133]
- capítulo 1 de Binney & Merrifield

### B) Buscar variables Cefeidas de nuestra Galaxia y sus parámetros y dibujar una relación P-L (no olvidar las referencias)



$$x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$$

$$\varepsilon = [1 - (b^2/a^2)]^{1/2}$$

excentricidad

$$r = \ell / (1 + \varepsilon \cos \theta)$$

$$\ell = b^2 / a$$

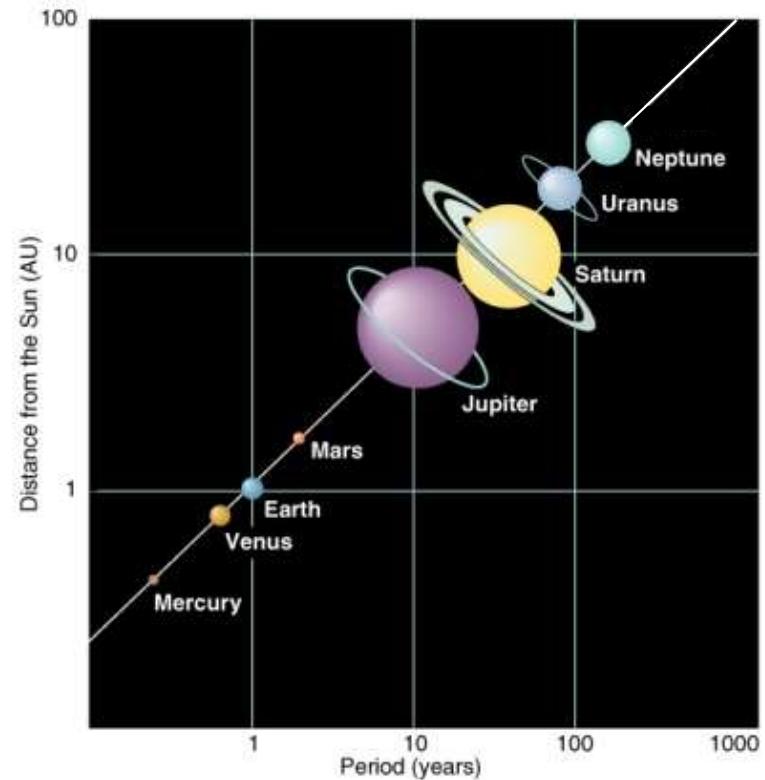
semi-latus rectum

veloc. de área

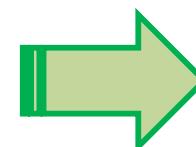
$$\frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} r^2 \frac{d\theta}{dt} \right) = 0$$

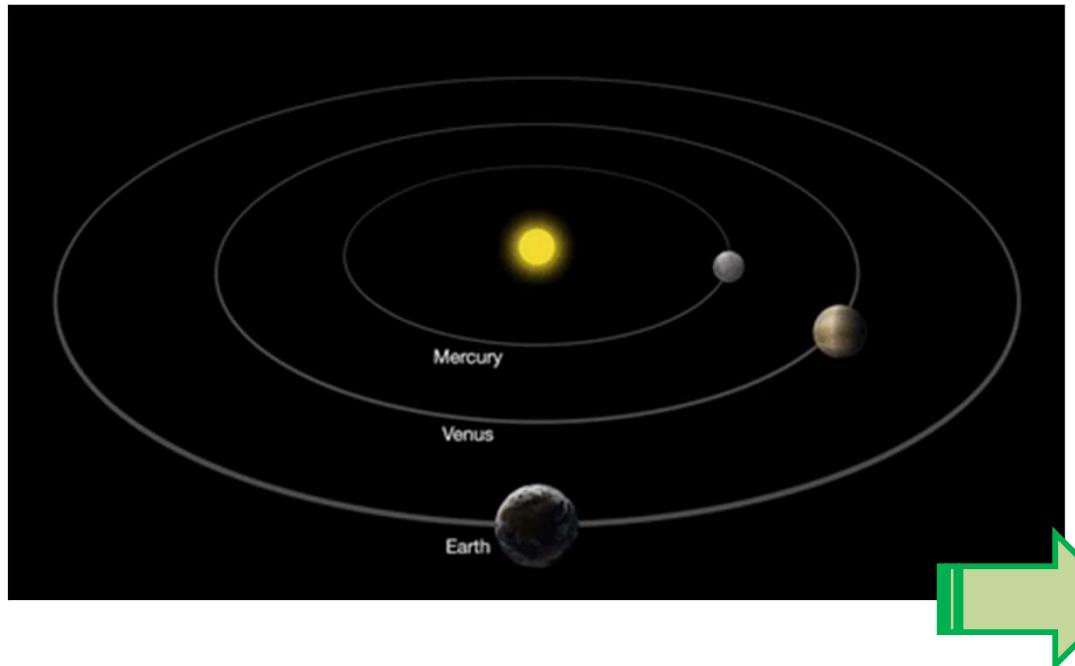
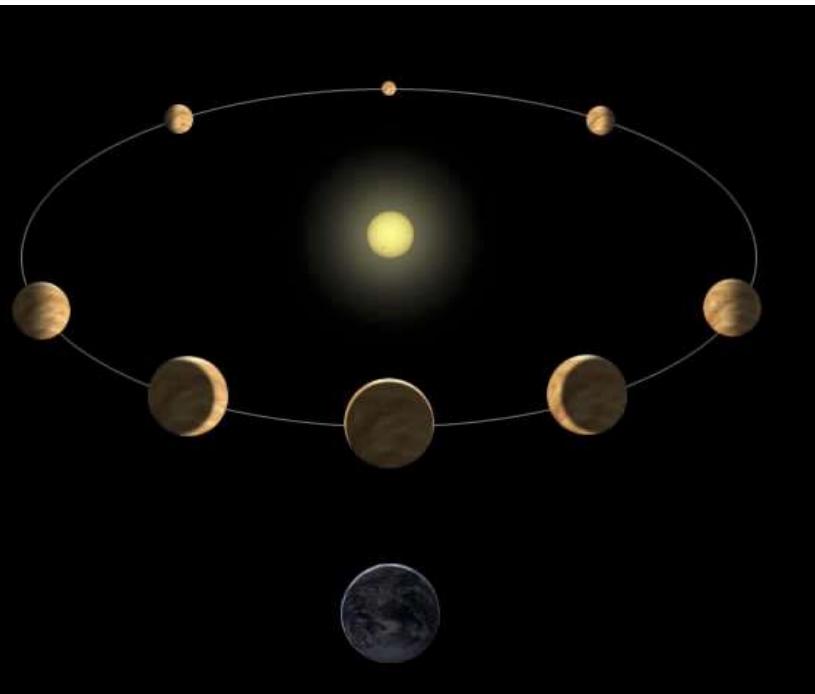
## Las 3 Leyes de Kepler

$$P^2 = \frac{(4 \pi^2)}{G (M+m)} a^3$$



Copyright 1999 John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.



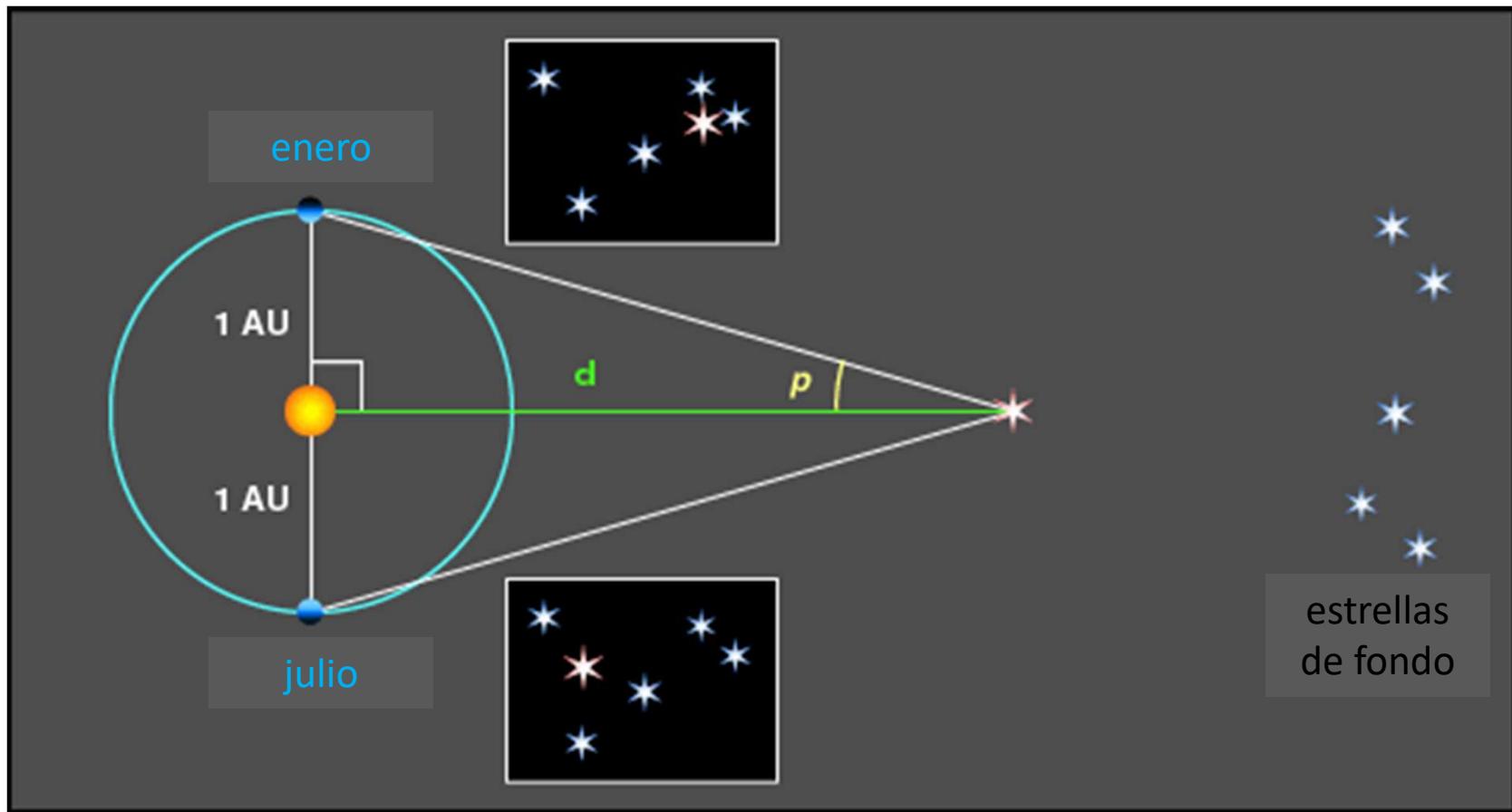


**Venus**  
Size and Illumination change  
from Dec 2016 to Mar 2017

Dec 20 2016  
19.6 Arc Seconds  
78.9 mil miles from Earth  
67.3 mil miles from Sun

Mar 10 2017  
54.1 Arc Seconds  
28.7 mil miles from Earth  
66.8 mil miles from Sun

## Paralaje



★ paralaje trigonométrica

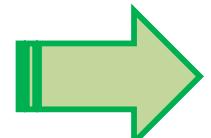
$$1 \text{ UA} / d \text{ [UA]} = \tan p \sim p \text{ [rad]}$$

$$d \text{ [UA]} = (p \text{ [rad]})^{-1}$$

$$d \text{ [pc]} = (p \text{ ["]})^{-1}$$

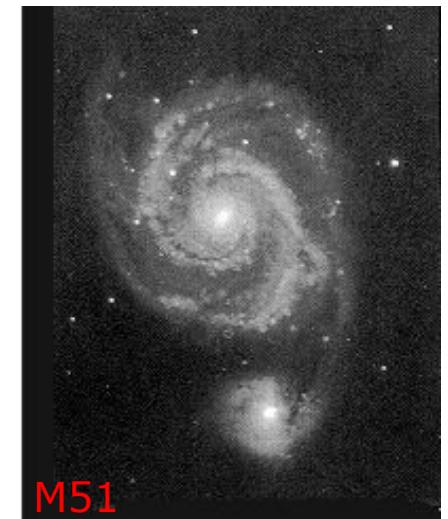
$$1 \text{ rad} = (180/\pi) \times 3600 \text{ "}$$

$$1 \text{ pc} = 206\,265 \text{ UA}$$

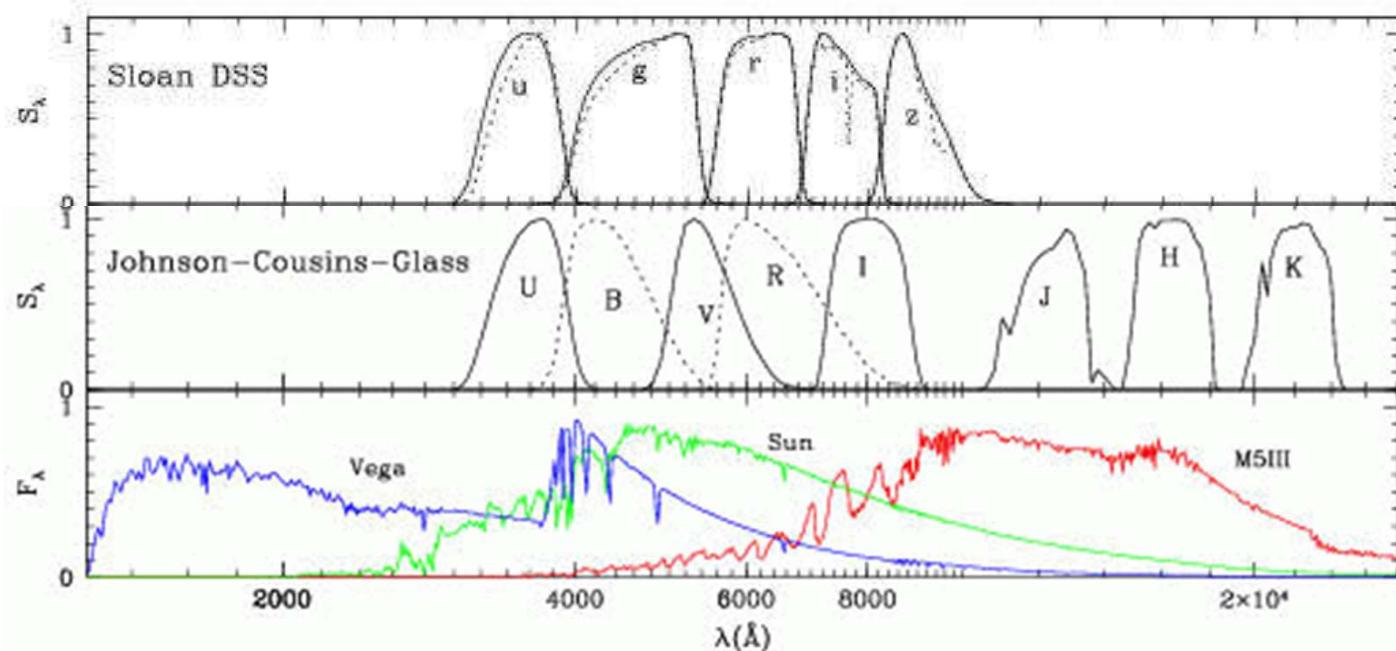
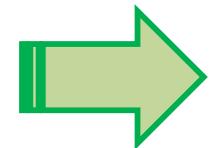
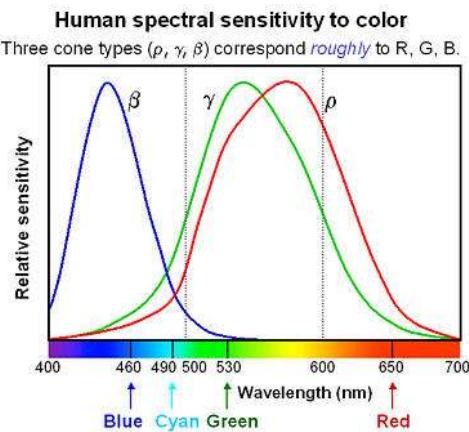


# Placas Fotográficas y la Fotometría

Leviathan:  
1.8 m (72")



- 1845-1850 – William Parsons (Lord de Rosse)



Opacidad de la atmósfera

Frecuencia

Longitud de onda

Radio

Infrared

Visible

Ultraviolet

X-rays

Gamma

Mt. Everest

rascacielos

humanos

pulgar

alfiler

bacteria

virus

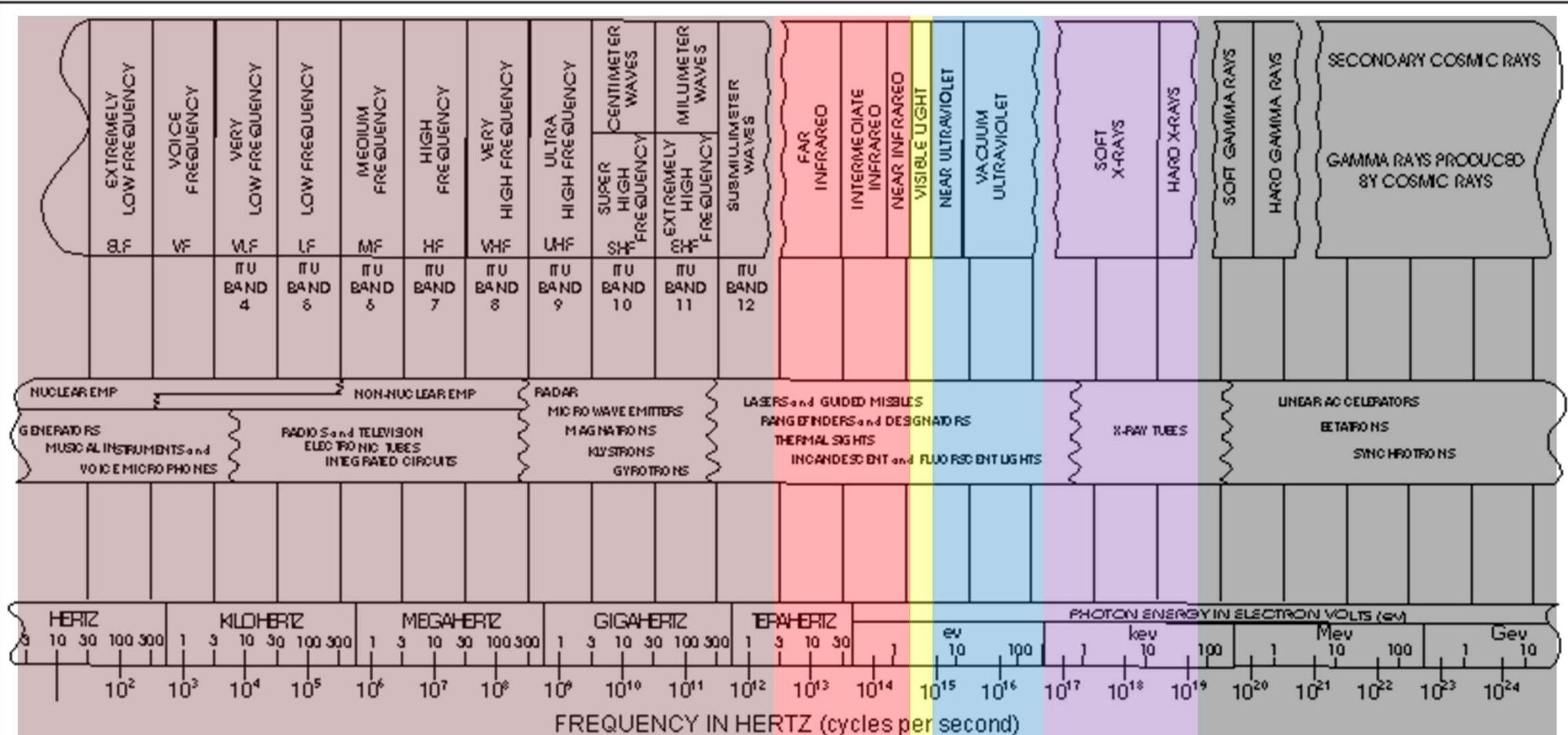
átomo



núcleo de un átomo

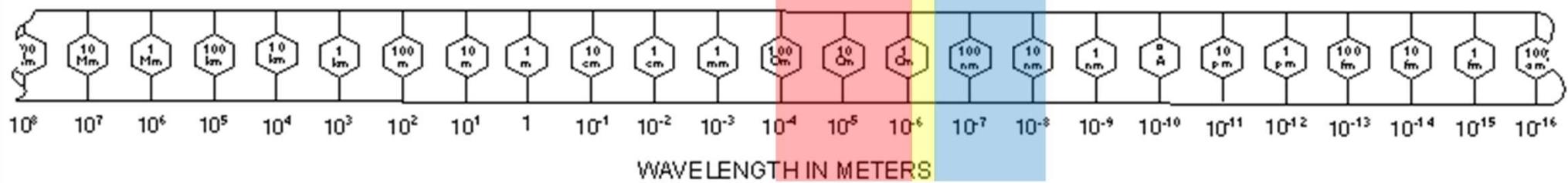
LONGITUDES EQUIVALENTES

# ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO



$$1 \text{ Hz} = \text{onda/s}$$

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$



electromagnetic spectrum

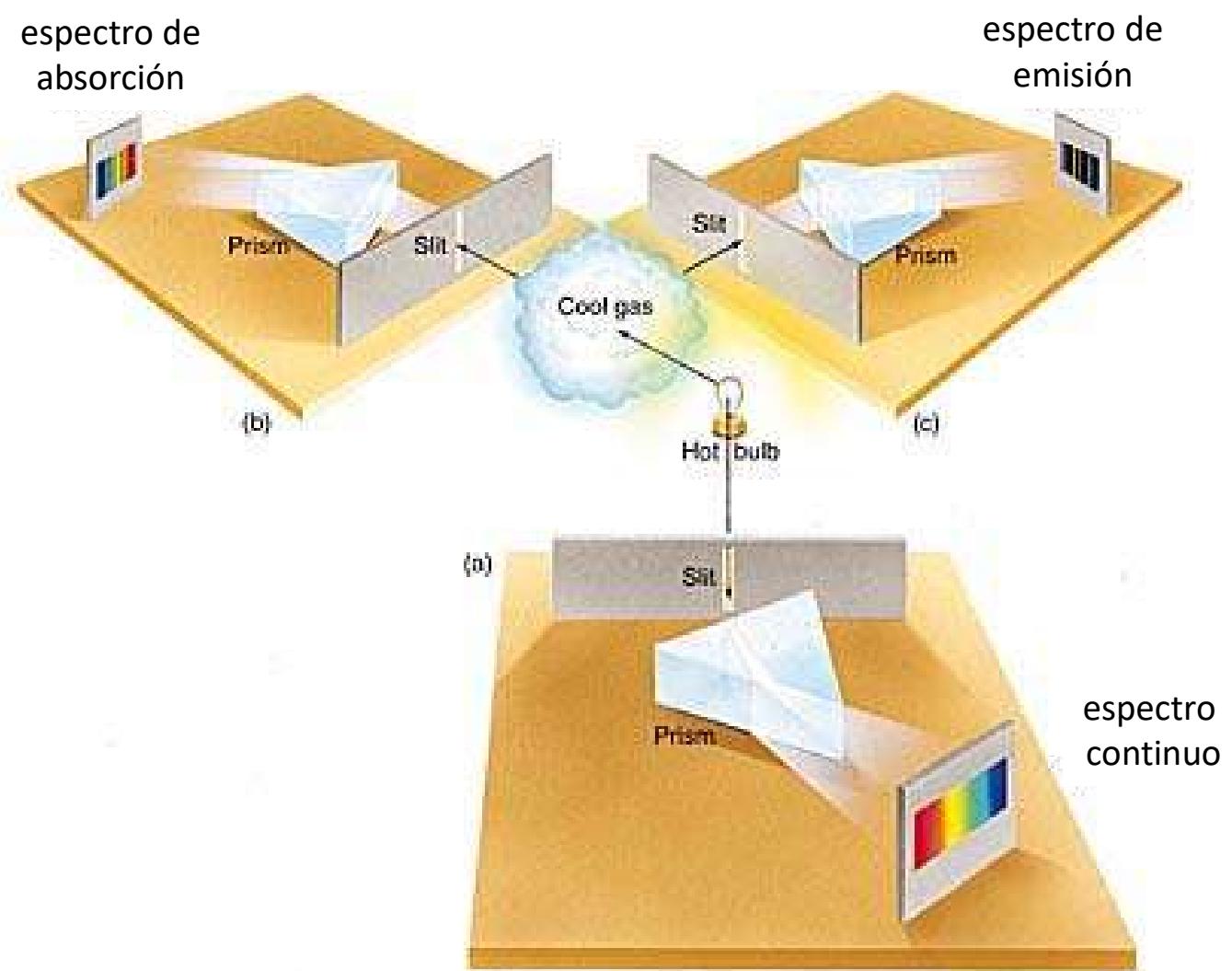
$$c = \lambda \cdot v$$

$$1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m} \quad 1 \text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$$

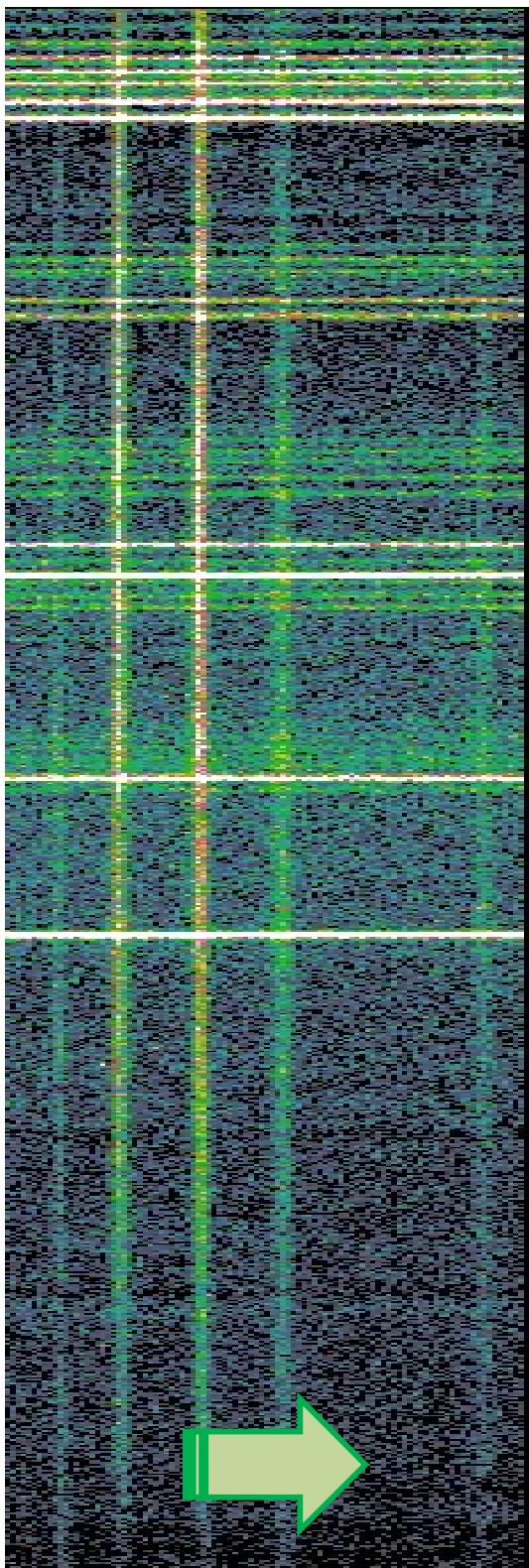
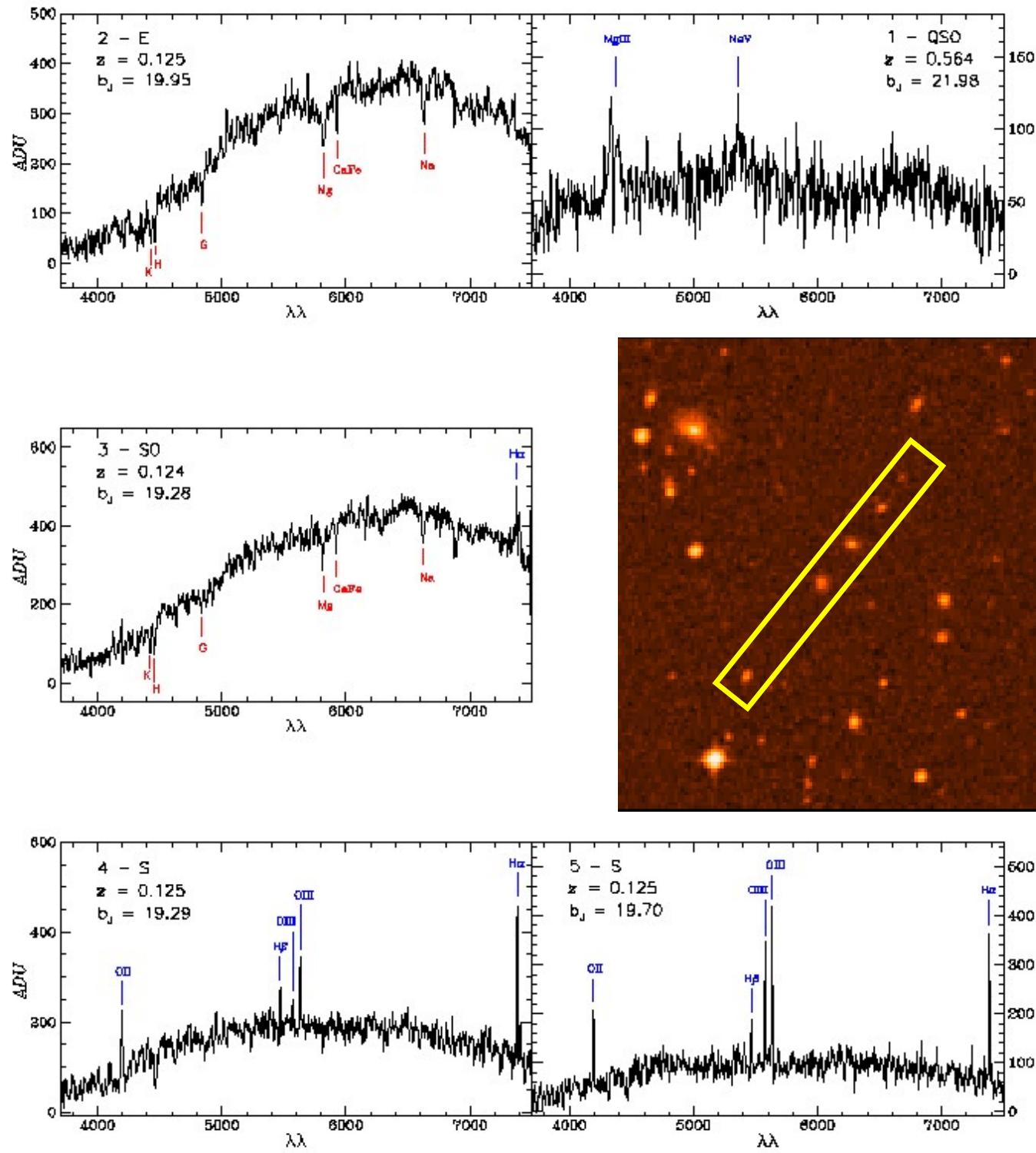
$$E = h v = h c / \lambda$$



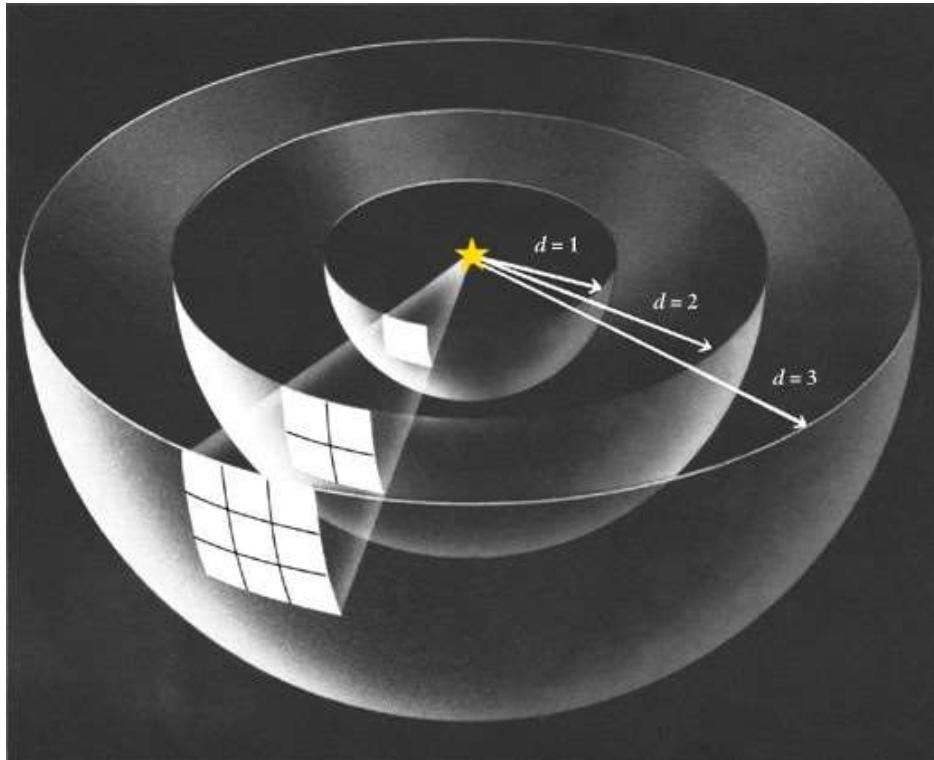
## Espectroscopia: continuo y líneas espectrales



# Espectroscopia



## Luminosidades, Flujos y Magnitudes



★ ley del inverso del cuadrado

$$F = L / (4 \pi d^2)$$

★ magnitudes aparentes

$$m_1 - m_2 = - 2.5 \log_{10} (f_1/f_2)$$

$$m = - 2.5 \log_{10} f + \text{cte}$$

★ magnitudes absolutas

$$f = (D/d)^2 F$$

$$m - M = - 2.5 \log_{10} (f/F)$$

$$m - M = 5 \log_{10} d[\text{pc}] - 5 + A$$

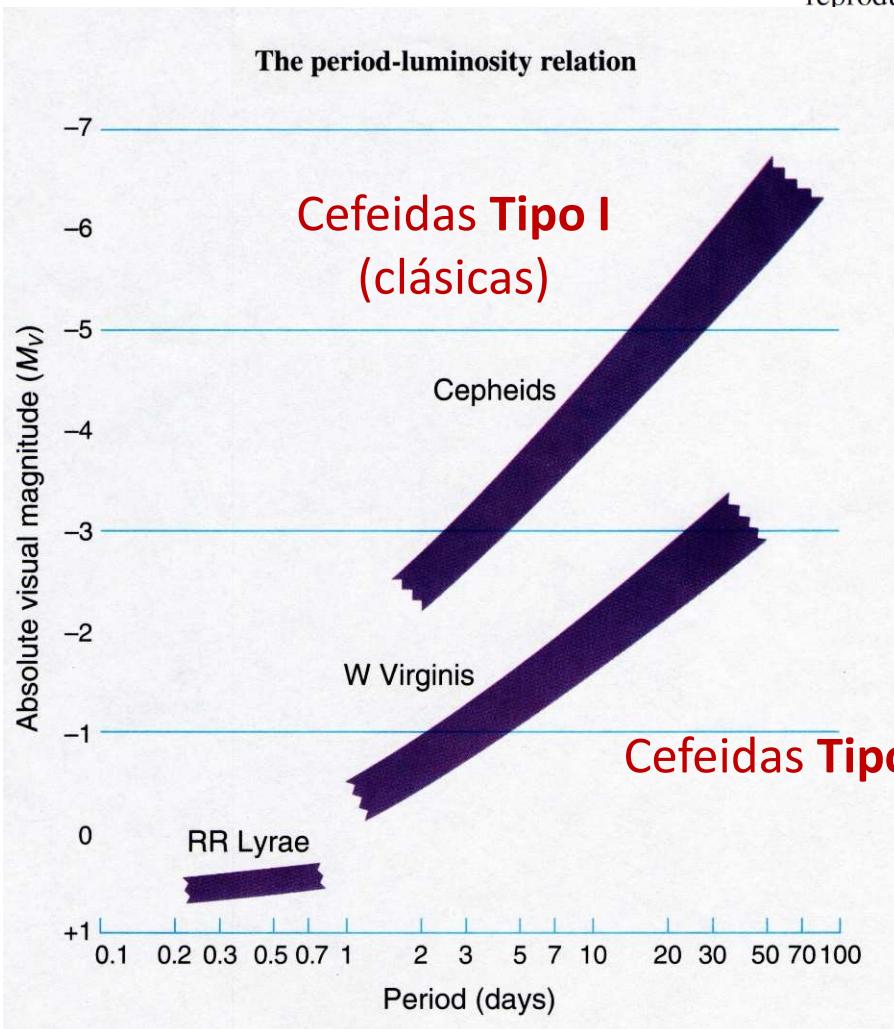
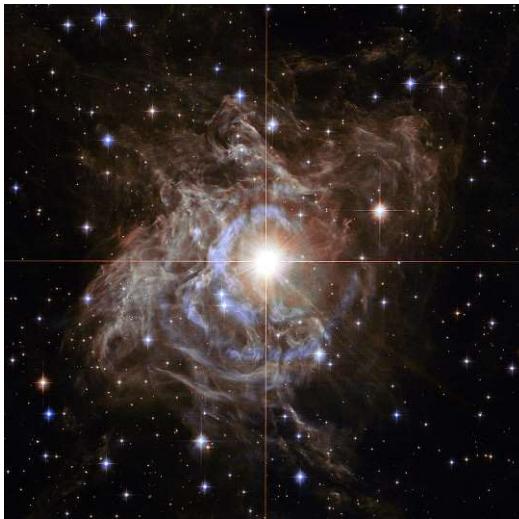
$$d[\text{pc}] = 10^{(m - M + 5 - A)/5}$$

$$m - M = 5 \log_{10} d[\text{kpc}] + 10 + A$$

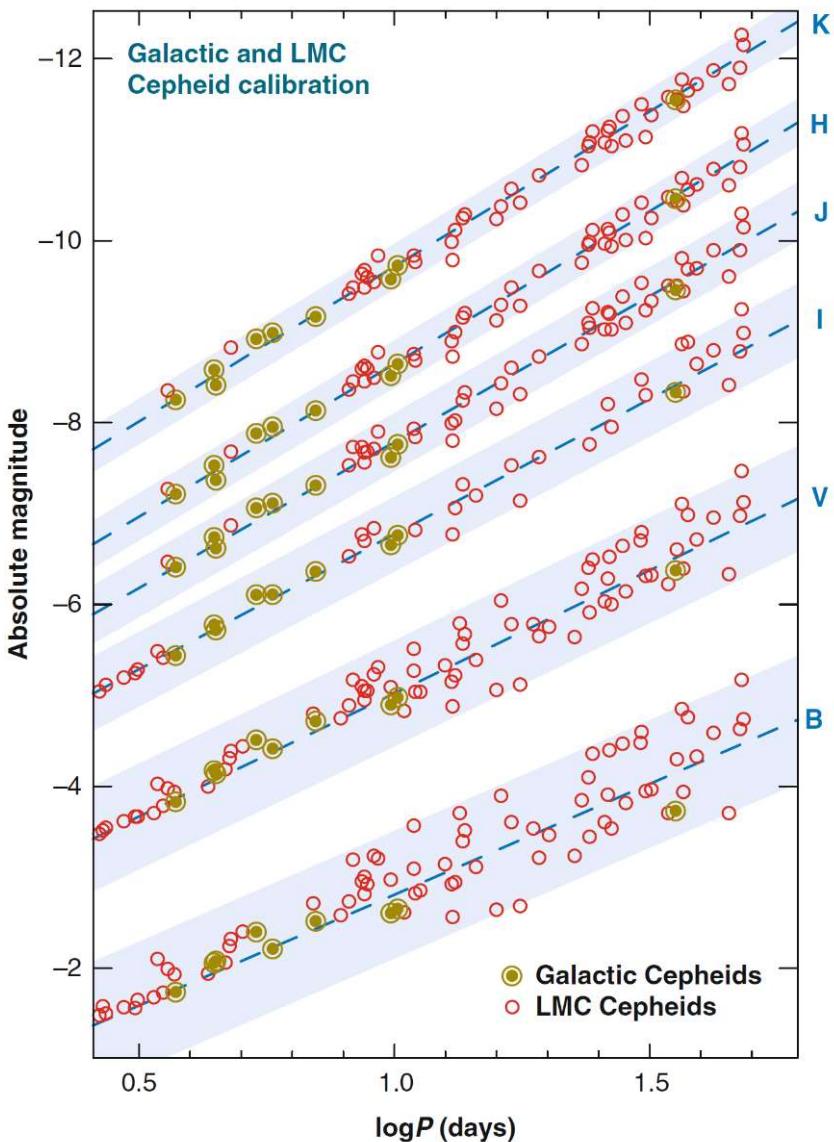
$$d[\text{kpc}] = 10^{(m - M - 10 - A)/5}$$

$$m - M = 5 \log_{10} d[\text{Mpc}] + 25 + A + K$$

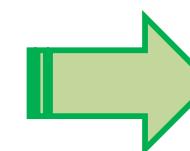
$$d[\text{Mpc}] = 10^{(m - M - 25 - A - K)/5}$$



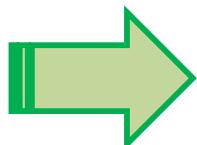
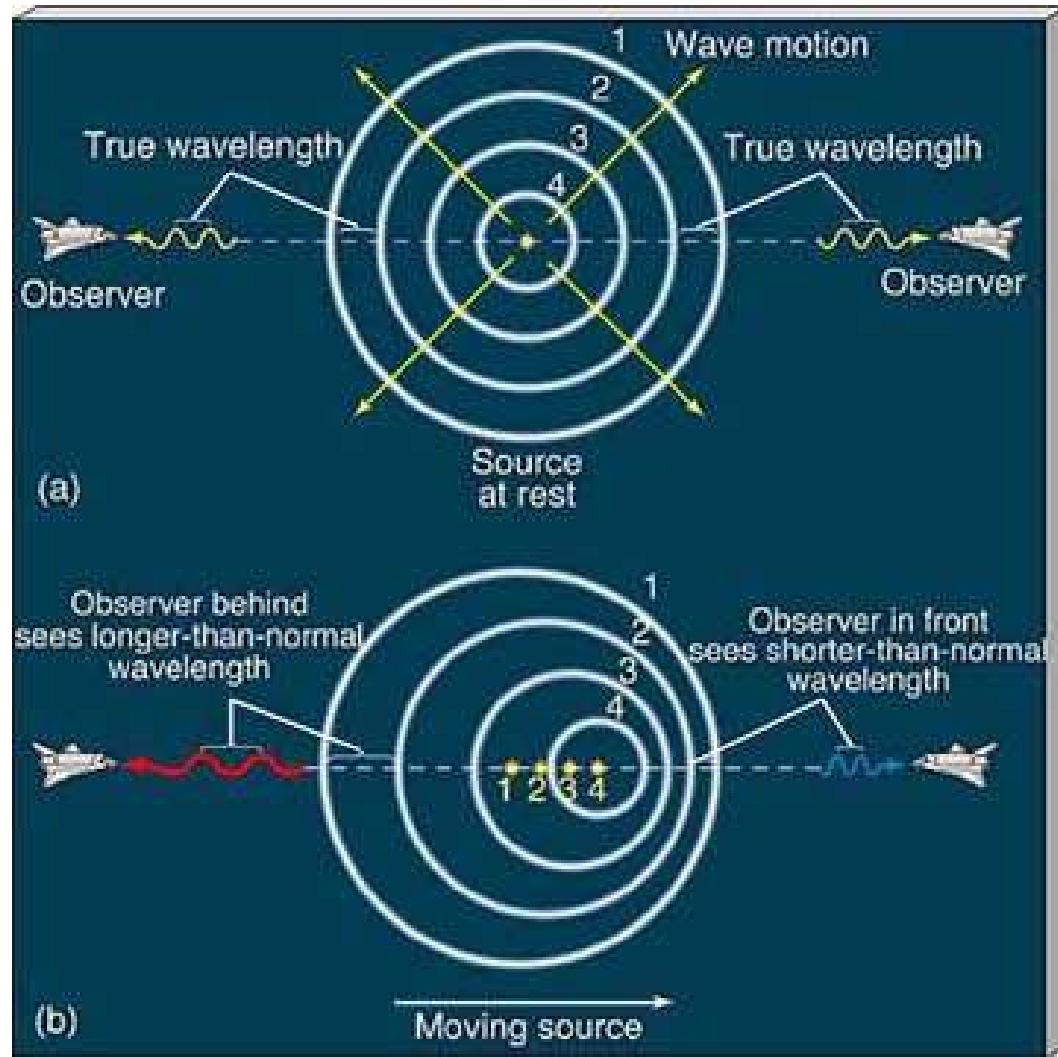
**Fig. 18.3** Modern version of Leavitt law for Cepheids in the Milky Way (filled symbols) and the Large Magellanic Cloud (LMC, open symbols). The vertical axis is  $-2.5 \log L + \text{constant}$ . The different shaded bands indicate brightnesses measured in different filters, from *blue* (bottom) to *infrared* (top) wavelengths (Credit: Freedman and Madore [1], reproduced by permission)



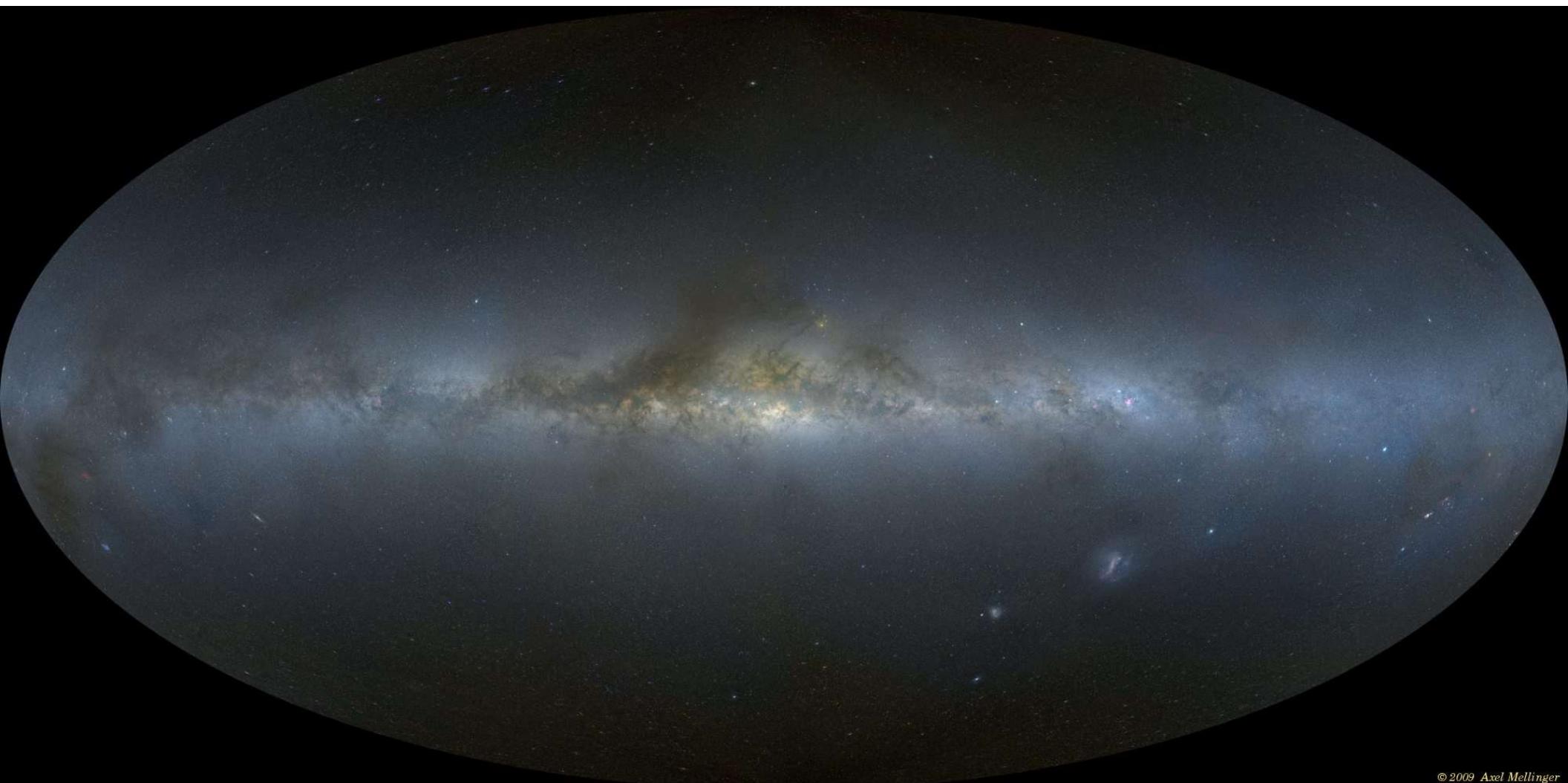
[Freedman & Madore, 2010, ARAA 48, 673]



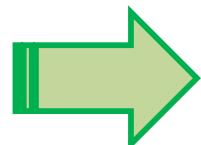
## Efecto Doppler y Corrimiento al Rojo



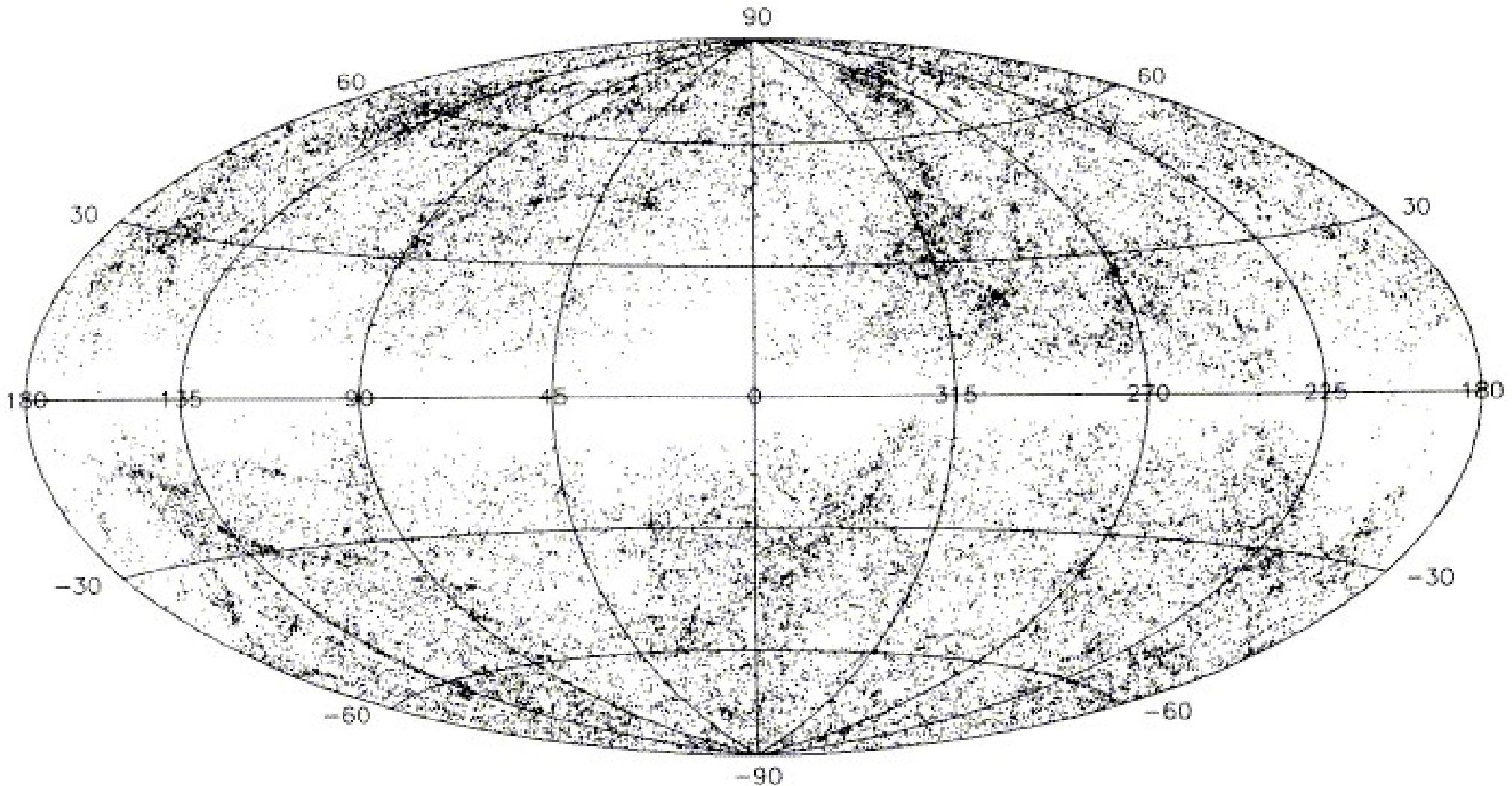
## Absorción Interestelar



© 2009 Axel Mellinger

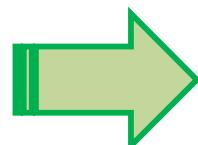


## Distribución de Galaxias en el Cielo



Distribución de 14650 galaxias de los catálogos UGC, ESO and MCG

[http://www.eso.org/~mhilker/Gallery/gallery\\_lect.html](http://www.eso.org/~mhilker/Gallery/gallery_lect.html)



## Distancias en Astronomía

<b>UA = unidad astronómica</b> <i>distancia Tierra-Sol</i>	= $1,5 \times 10^8$ km (149.600.000 km)
<b>a.l. = año-luz</b> <i>distancia que la luz viaja en 1 año</i>	= $9,5 \times 10^{12}$ km (9,5 billones de km)
<b>pc = parsec = parallaxe second</b> <i>distancia en la cual 1 UA es vista bajo un ángulo de 1"</i>	= $3,1 \times 10^{13}$ km (31 billones de km)
<b>kpc = kiloparsec</b>	= $10^3$ pc
<b>Mpc = megaparsec</b>	= $10^6$ pc
<b>Gpc = gigaparsec</b>	= $10^9$ pc