

Cosmología y Sistema Solar

Andrea Sosa

PDU Ciencias Físicas

asosa@cure.edu.uy

Geología, Licenciatura en Gestión Ambiental

CURE

5 de Abril, 2018

Índice

I. Cosmología

1. Teoría del *Big Bang*: modelo estándar acerca del origen del Universo.
2. Nucleosíntesis primordial: formación de los átomos de Hidrógeno y Helio.
3. Partículas sub-atómicas y *quarks*.

II. Sistema Solar

1. Formación del sistema planetario.
2. Principales poblaciones de objetos y sus características.
3. Génesis de la Luna.
4. Composición de asteroides y meteoritos.

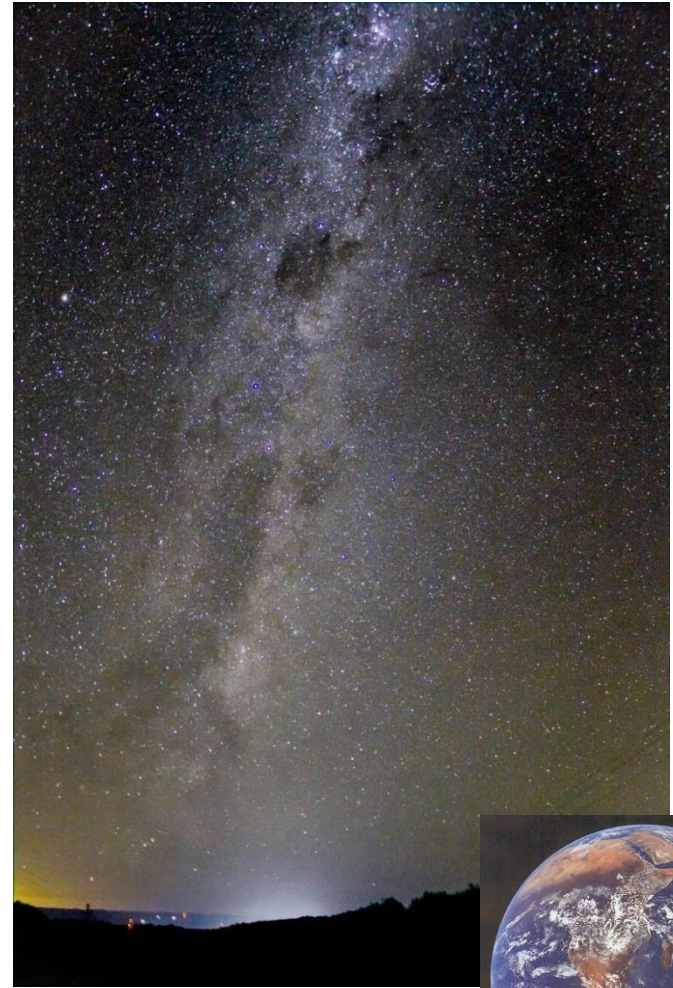
¿Qué es la Astronomía?



- .El nombre significa literalmente “Odenación de las estrellas”.
- .Se define como el estudio del Universo y todo lo que contiene.
- .**Universo o Cosmos:** es la totalidad de espacio, tiempo, materia y energía.
- .La Astronomía requiere un cambio profundo en nuestra visión del cosmos, y considerar a la materia en escalas nada familiares a nuestra experiencia cotidiana.

Las interrogantes esenciales

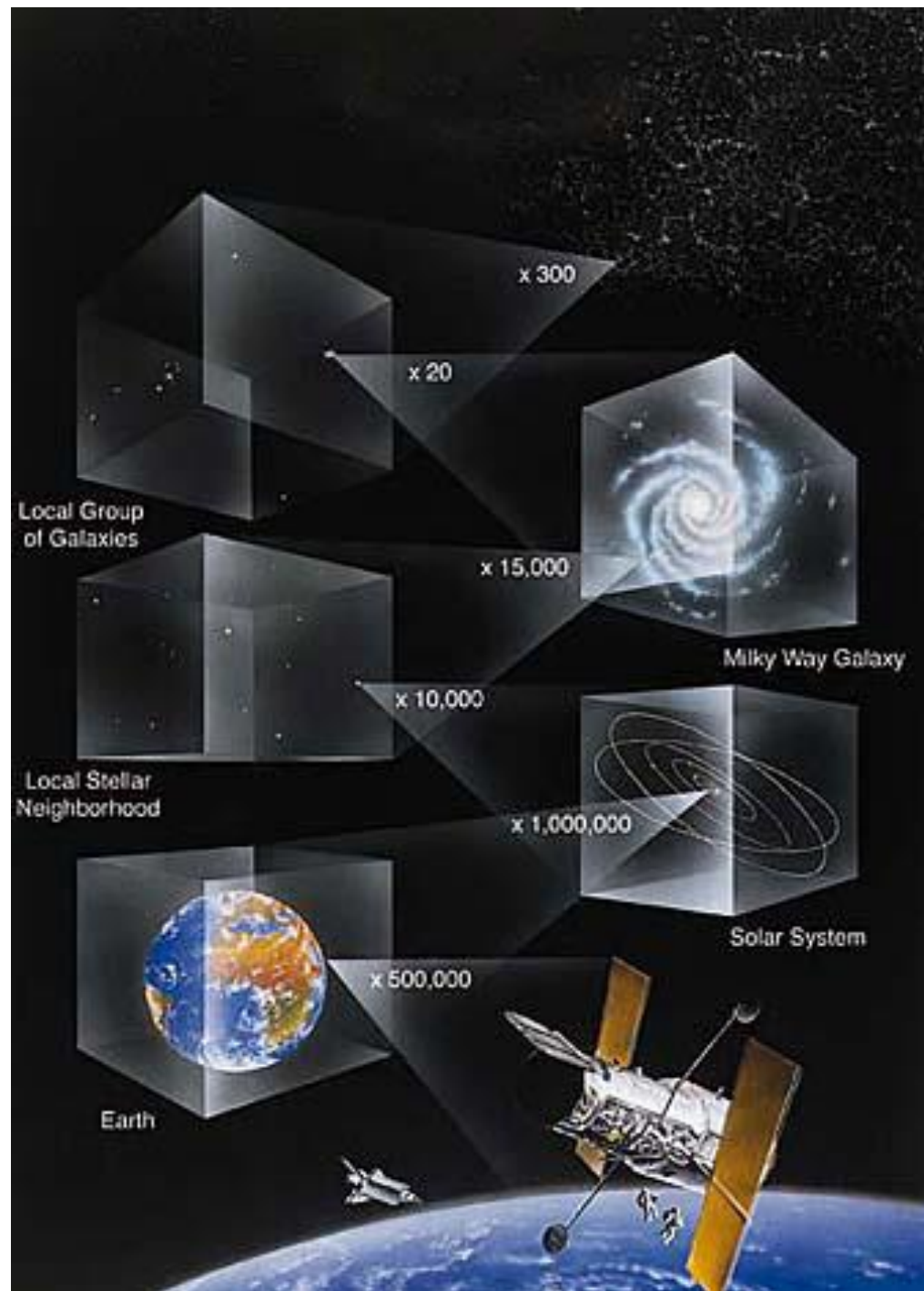
.Al planificar y desarrollar su investigación, las preguntas que se plantean los astrónomos siguen en la raíz profunda de nuestra comprensión de quienes somos: *¿De donde venimos?*
¿Cuál es nuestro destino?
¿Estamos solos en el Universo?



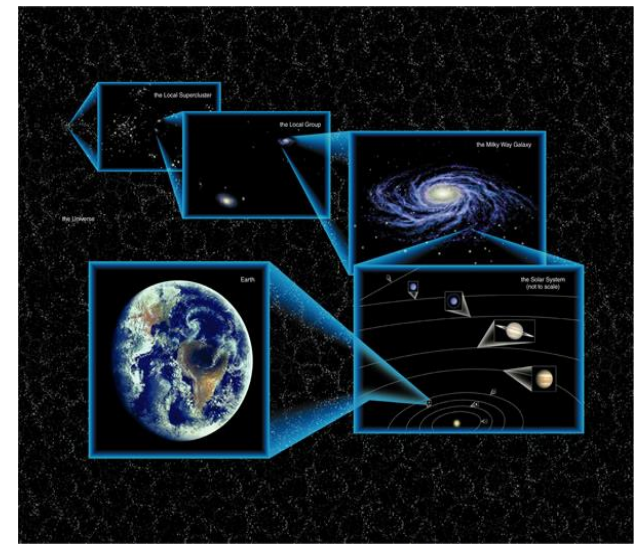
Nuestro lugar en el Universo

(De abajo hacia arriba:) Una estación espacial (y astronautas), la Tierra, el Sistema Solar, la vecindad local de estrellas, la Vía Láctea, y el cúmulo de galaxias más cercano. Los números indican el aumento sucesivo en la escala de la imagen.

(Fig. 1.5, *Astronomy Today*)



Universo a diferentes escalas



.(En sentido antihorario:) **La Tierra** es uno de los 8 planetas que orbitan al Sol en nuestro Sistema Solar. **Nuestro Sistema Solar** es uno más entre los cien mil millones de sistemas estelares que forman parte de nuestra galaxia, la *Vía Láctea*. **Nuestra galaxia** es una de las dos galaxias mayores de un conjunto de algunas decenas que forman el Grupo Local. **El Grupo Local** se encuentra cerca de los confines del Supercúmulo Local (en Virgo). **El Supercúmulo Local** es una pieza más de de una intrincada y compleja **estructura a gran escala** formada por galaxias a través del Universo.

La *Conexión Cósmica*



.la mayoría de los elementos químicos que forman nuestros cuerpos fueron creados en los núcleos calientes de estrellas que desaparecieron hace mucho tiempo.

La cosmología moderna aborda las siguientes cuestiones fundamentales:

·¿*Cúan grande* es el universo?

·¿*Cúando* se originó?

·¿*Cómo* se originó?

·¿*Cómo y cuándo se originó la materia?* (desde partículas subatómicas, pasando por átomos, planetas, estrellas, galaxias, cúmulos y supercúmulos de galaxias, hasta llegar a los filamentos, vacíos y burbujas que forman la estructura a gran escala).

·¿Continúa la aglomeración jerárquica de materia más allá de *la estructura a gran escala* que conocemos hoy? ¿Existe alguna escala a la cual el universo se presente uniforme y homogéneo?

·¿Cuáles son los *principales componentes del Universo?*

·¿*Cúal será el futuro del Universo?*

Cosmología

La cosmología moderna se basa en un *modelo de universo en expansión*. Sobre la base de este modelo, ha sido posible empezar a abordar dichas cuestiones.

Dos hitos fueron decisivos hacia el desarrollo de una teoría que explicara cómo se formó el universo, y cómo evolucionó hasta el presente:

–El **descubrimiento de la naturaleza de las galaxias** en la década de **1920**.

–El desarrollo de la **Teoría General de la Relatividad** por Albert Einstein en la década de **1910**.

Galaxias

- Las galaxias **son grandes conglomerados gravitacionalmente ligados de estrellas, gas, polvo y materia oscura.**
- **Conocemos millones de galaxias;** muchas menores que la Vía Láctea, varias comparables, y unas pocas mucho mayores.
- La luz que estamos recibiendo de las galaxias más distantes fue emitida antes que la Tierra existiera.
- Las galaxias están separadas unas de otras por grandes distancias.



M101: *Galaxia del Remolino*

Esta galaxia masiva se encuentra a unos 22 millones de años-luz. Presenta varias regiones brillantes de formación estelar en sus brazos espirales.

Galaxias espirales



La galaxia *Andrómeda* (M31). Es el objeto más distante visible a simple vista. Esta inmensa galaxia espiral, con un tamaño de más de 200 mil años-luz, aparece a simple vista como una pequeña nube difusa y débil en la constelación de Andrómeda.

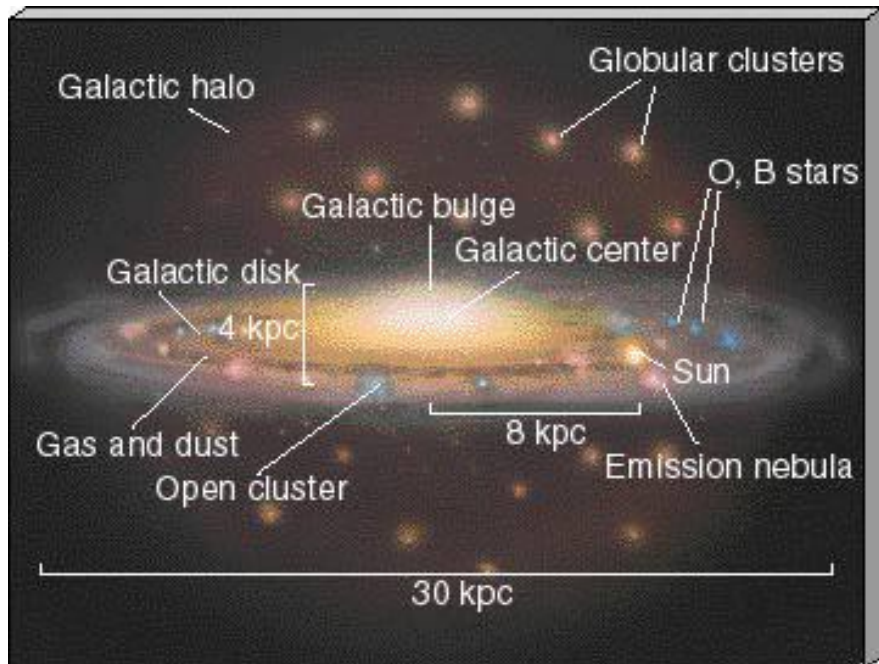


La galaxia *El Sombrero* (M104). Un núcleo brillante y blanco es rodeado por espesas bandas oscuras de polvo y gas interestelar. La galaxia se extiende por unos 50 mil años-luz y dista unos 28 millones de años-luz de la Tierra..

Galaxias

- En el S. XX la tecnología demuestra que que nuestra *Vía Láctea* es una más de esos “universos isla” que teorizó Kant, los cuales fueron renombrados como “galaxias”.
- Edwin Hubble observa la “nebulosa de Andrómeda”, distinguiendo por primera vez estrellas, algunas de las cuales resultaron ser **Cefeidas**, por lo cual pudo estimar sus distancias.
- Descubrió entonces que esa “nebulosa” era una galaxia ubicada a unos 2 millones de años-luz (lo que sobrepasaba por lejos el tamaño estimado por **Shapley** para la Vía Láctea, o sea unos 300 mil años-luz).

La Vía Láctea: Ejemplo de galaxia espiral



·El Sol se ubica a unos 8 kpc del centro galáctico.

·En la vecindad del Sol el disco tendría unos 300 pc de espesor (~ 1000 años-luz, equivalente a 1 % del diámetro del disco).

·En el **halo galáctico** abundan las **estrellas rojas más viejas** y los **cúmulos globulares**.

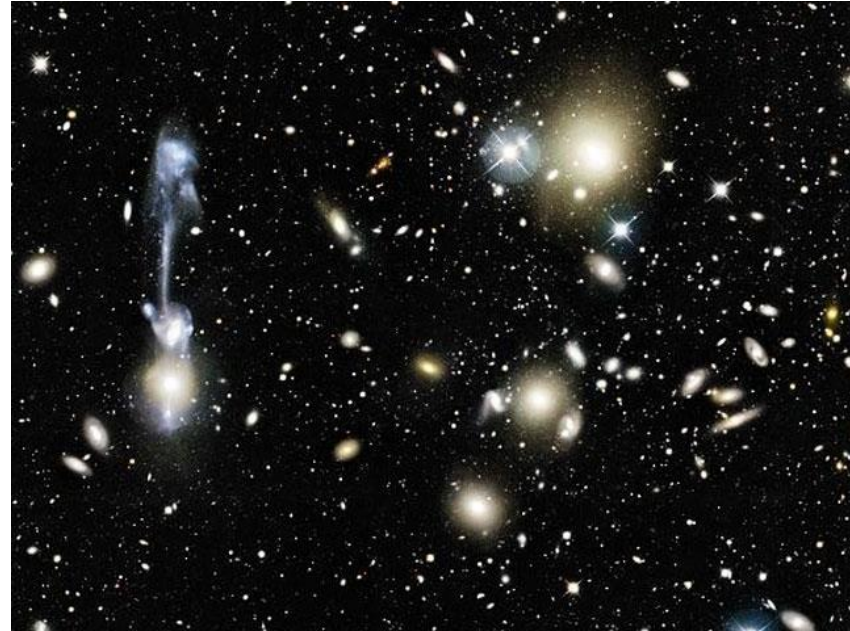
·Al igual que el halo, el **bulbo** contiene gran cantidad de estrellas rojas viejas y cúmulos globulares.

·Los **discos galácticos** son ricos en gas (observado por la emisión en 21 cm del H neutro) y en polvo (absorbente en el óptico).

·Las estrellas se forman dentro de los **brazos espirales**.

Cúmulos y Supercúmulos de galaxias

Se conocen muchos cúmulos de galaxias, de formas y tamaños variados. Los **cúmulos grandes** como el de Virgo contienen varios miles de galaxias distribuidas bastante uniformemente en el espacio. Los **cúmulos pequeños** como el Grupo Local contienen solamente unas pocas unidades o decenas de galaxias y son bastantes irregulares en forma. Existe una pequeña fracción de **galaxias solitarias** que no pertenecen a ningún cúmulo.



El cúmulo de *galaxias Abell 1185* abarca aproximadamente 1 millón de años-luz y se encuentra a unos 20 millones de años-luz de la Tierra. El cúmulo contiene centenares de galaxias.

Más allá del Grupo Local, la próxima gran concentración de galaxias la conforma el **Cúmulo de Virgo**. Se encuentra a unos 18 Mpc de la Vía Láctea. Contiene unas 2500 galaxias, c/u con unos cien mil millones de estrellas. Tiene una extensión de unos 3 Mpc.



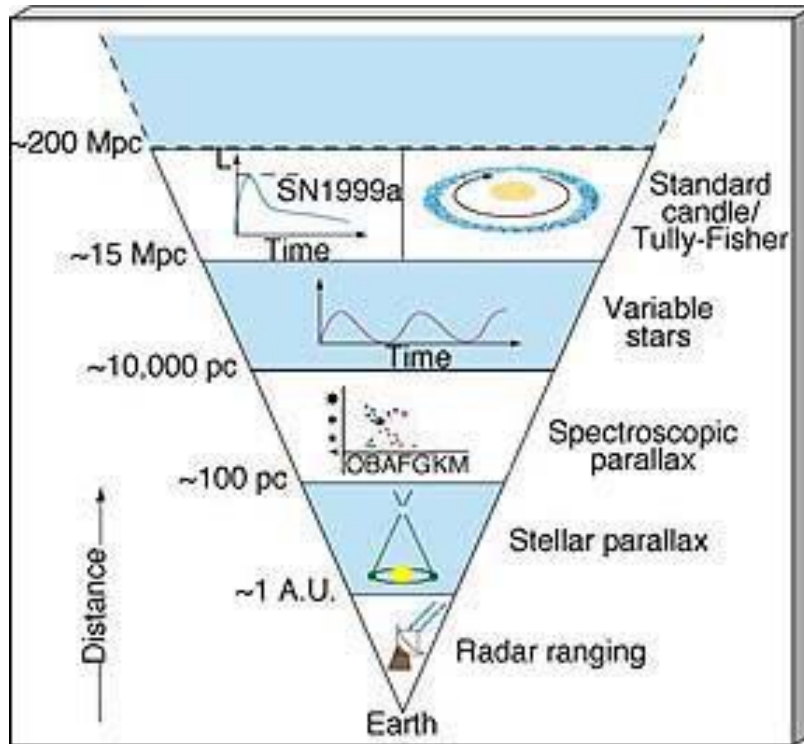
Hubble Deep Field.
NASA/HTC/WFPC2

La imagen muestra objetos hasta la magnitud 30, o sea unos cuatro mil millones de veces más débiles que los visibles a simple vista.

Salvo un par de estrellas de campo, todos los objetos son galaxias, y algunas de ellas son los objetos más lejanos jamás observados, tal vez galaxias en formación, a menos de mil millones de años tras el *Big Bang*.

Gracias a estas observaciones hoy sabemos que en el Universo existen decenas de miles de millones de galaxias.

La “escalera de distancias cósmicas”



.Figure 24.12, *Astronomy Today*. An inverted pyramid summarizes the distance techniques used to study different realms of the universe. The techniques shown in the bottom four layers—radar ranging, stellar parallax, spectroscopic parallax, and variable stars—take us as far as the nearest galaxies. To go farther, we must use new techniques, the method of standard candles and the Tully—Fisher relation, each based on distances determined by the four lowest techniques.

.Las técnicas nuevas de medición de distancias son **calibradas** usando distancias obtenidas por otros medios, aplicables al entorno más local.

. Por acumulación de errores las distancias a los objetos más lejanos serán las más inciertas.

La ley de Hubble

.En 1912 **Slipher** descubre que cada galaxia espiral que observaba mostraba un corrimiento al rojo en su espectro, es decir un **movimiento de recesión** (alejamiento).

.En general, con la excepción de unos pocos sistemas cercanos, **cada galaxia conocida es parte de un movimiento general que las aleja de nosotros, en todas direcciones.**

.En los años 1920's Edwin Hubble grafica la velocidad de recesión de las galaxias en función de su distancia ("**diagramas de Hubble**"), encontrando una ley simple que las vincula:

“La velocidad a la cual la galaxia se aleja es directamente proporcional a su distancia.”

.Dicha relación se conoce como "**Ley de Hubble**", aunque no es una ley propiamente dicha, sino más bien una propiedad del universo observable (por eso se la conoce también como "Flujo de Hubble").

.(Hubble, 1929. Figura extraída del cursillo "Energía Oscura: una perspectiva observacional" por Carlos Salgado, junio de 2009).

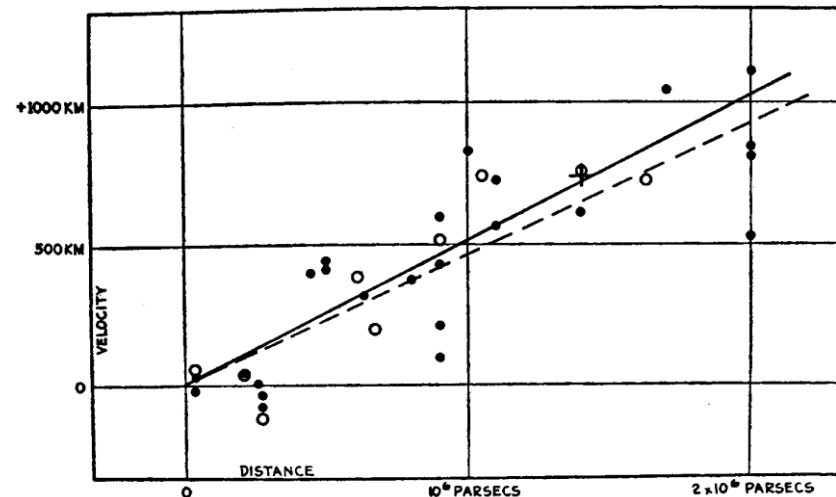


FIGURE 2.4 Edwin Hubble's original plot of the relation between redshift (vertical axis) and distance (horizontal axis). Note that the vertical axis actually plots cz rather than z , and that the units are accidentally written as km rather than km/s.

La ley de Hubble y la expansión del universo

.De acuerdo al diagrama de Hubble de la figura, se tendría:

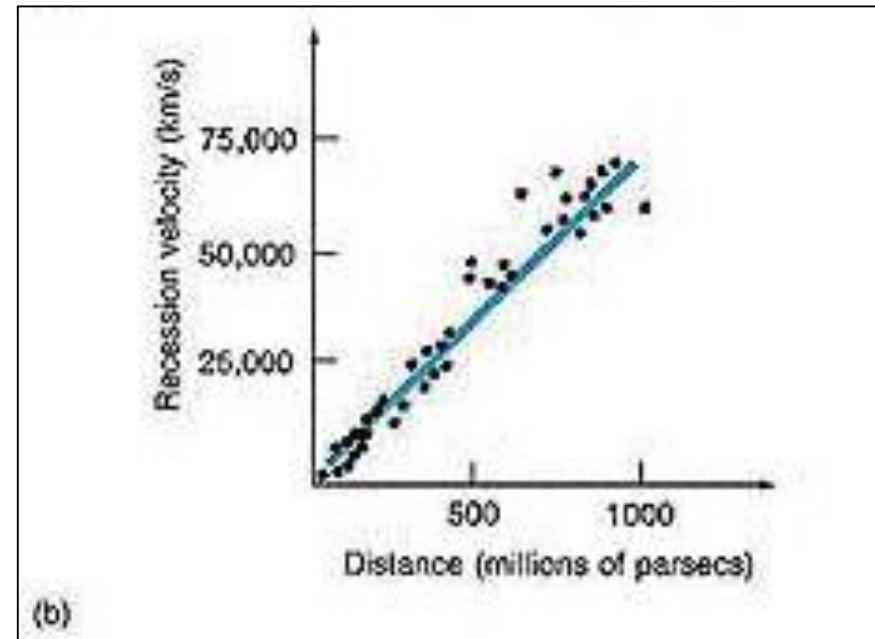
$$H_0 = \frac{65000 \text{ km/s}}{1000 \text{ Mpc}} = 65 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}}$$

$$H_0 = 70 \pm 7 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

.Otras estimaciones recientes arrojan el valor:

.El valor de H se encuentra en constante “evolución” a medida que los cosmólogos lo refinan con nuevas observaciones más precisas.

.Figure 24.31 (b), *Astronomy Today*. Plot of recessional velocity versus distance for numerous other galaxies within about 1 billion pc of Earth.



La ley de Hubble y la expansión del universo

• **H** es una de las constantes fundamentales de la naturaleza, pues **especifica la tasa de expansión del universo**.

• La ley de Hubble permite determinar las **distancias a los objetos más remotos**, hasta tan lejos como podamos medir sus espectros.

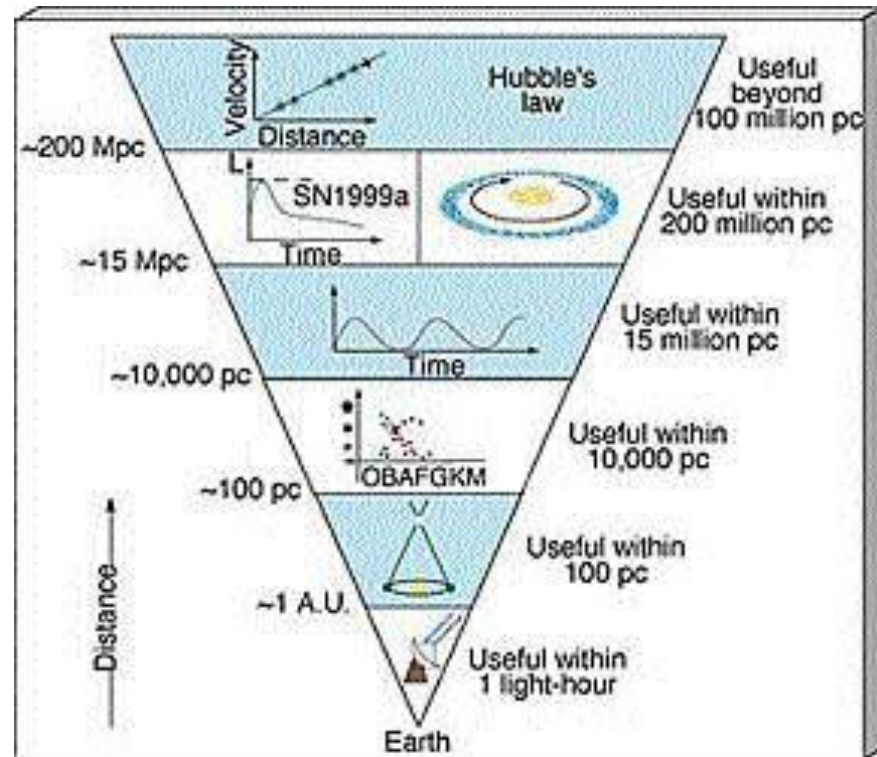


Fig. 24.32, *Astronomy Today*. La ley de Hubble se ubica en la parte más superior de la pirámide invertida de las seis técnicas de medición de distancias aplicadas en astrofísica.

$$v = H_0 r$$

La ley de Hubble y la expansión del universo

.Hubble atribuyó el corrimiento observado en las líneas espectrales de las galaxias más lejanas al efecto doppler, pero estrictamente la causa es la expansión del universo (de acuerdo al modelo cosmológico estándar actual).

.Para distinguir el corrimiento al rojo “recesional” de aquél producido por objetos en movimiento relativo (por ej. galaxias orbitando dentro de un cúmulo, o eventos explosivos dentro de un núcleo galáctico), se define al corrimiento resultante de la ley de Hubble como **corrimiento al rojo cosmológico o cósmico**.

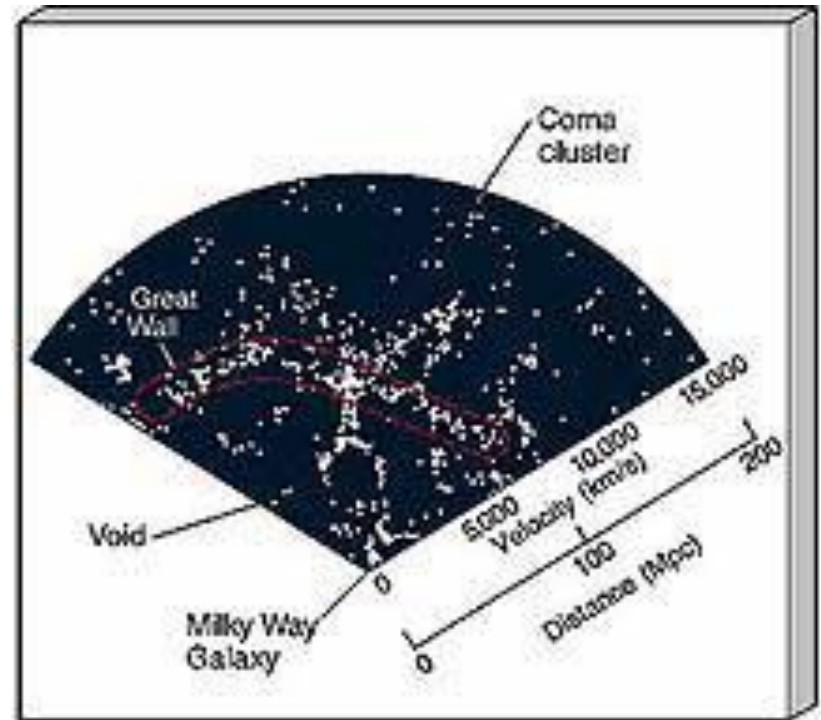
.Aquellos objetos tan remotos que muestran corrimientos al rojo cosmológicos se dice que están a **distancias cosmológicas** (es decir comparables a la escala del universo).

.**La recesión de las galaxias prueba que el cosmos no se halla en estado estable, cuando se lo observa a las más grandes escalas** (es decir del orden de las distancias entre cúmulos de galaxias); los objetos del universo están en movimiento relativo constante, y tal movimiento no es aleatorio sino ordenado: **el universo se está expandiendo, y por ende, evolucionando**.

La estructura a gran escala

- Usando la ley de Hubble podemos completar nuestro censo de la distribución a gran escala de las galaxias.
- Una de las campañas observacionales más completas fue la realizada por la Univ. de Harvard, resumida en un catálogo con las posiciones y los corrimientos al rojo de todas las galaxias a menos de 250 Mpc de la Vía Láctea.

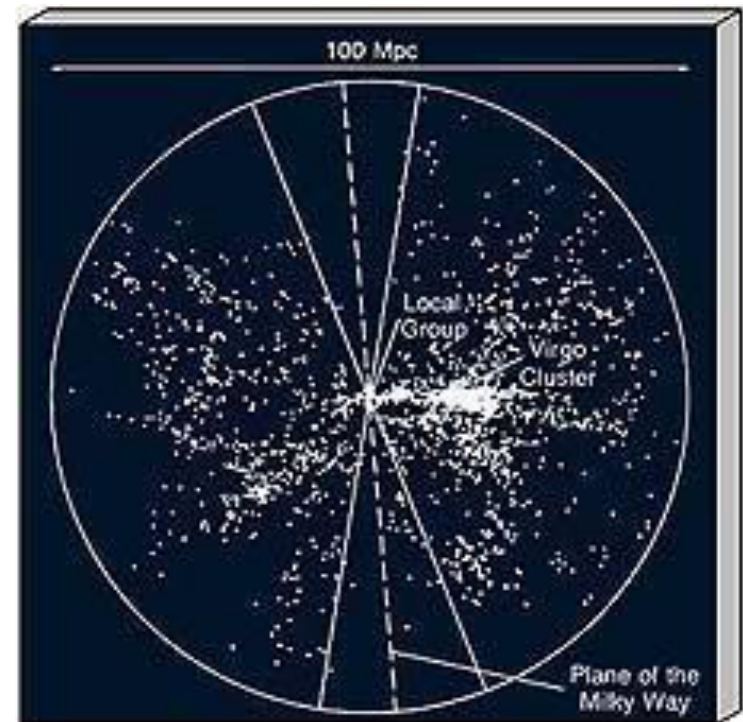
• Mapearon el cielo en “rebanadas” de unos 6° . La figura muestra la primera “rebanada” cubriendo a una región del cielo en dirección perpendicular a nuestro plano galáctico.



• Fig. 24.33, *Astronomy Today*. The first slice of a survey of the universe, covering 1057 galaxies out to an approximate distance of 200 Mpc, clearly shows that galaxies and clusters are not randomly distributed on large scales. Instead, they appear to have a filamentary structure, surrounding vast, nearly empty voids. The distances shown assume $H_0 = 65 \text{ km/s/Mpc}$.

Cúmulos y Supercúmulos de galaxias

Se cree que los cúmulos de galaxias forman a su vez “cúmulos de cúmulos”, o sea **supercúmulos de galaxias**. La figura muestra el **Supercúmulo Local**, el cual contiene al Grupo Local y al Cúmulo de Virgo. Cada punto representa una galaxia. El diagrama está centrado en la Vía Láctea. La Vía Láctea se ubicaría a unos 18 MPc del centro del Supercúmulo Local.



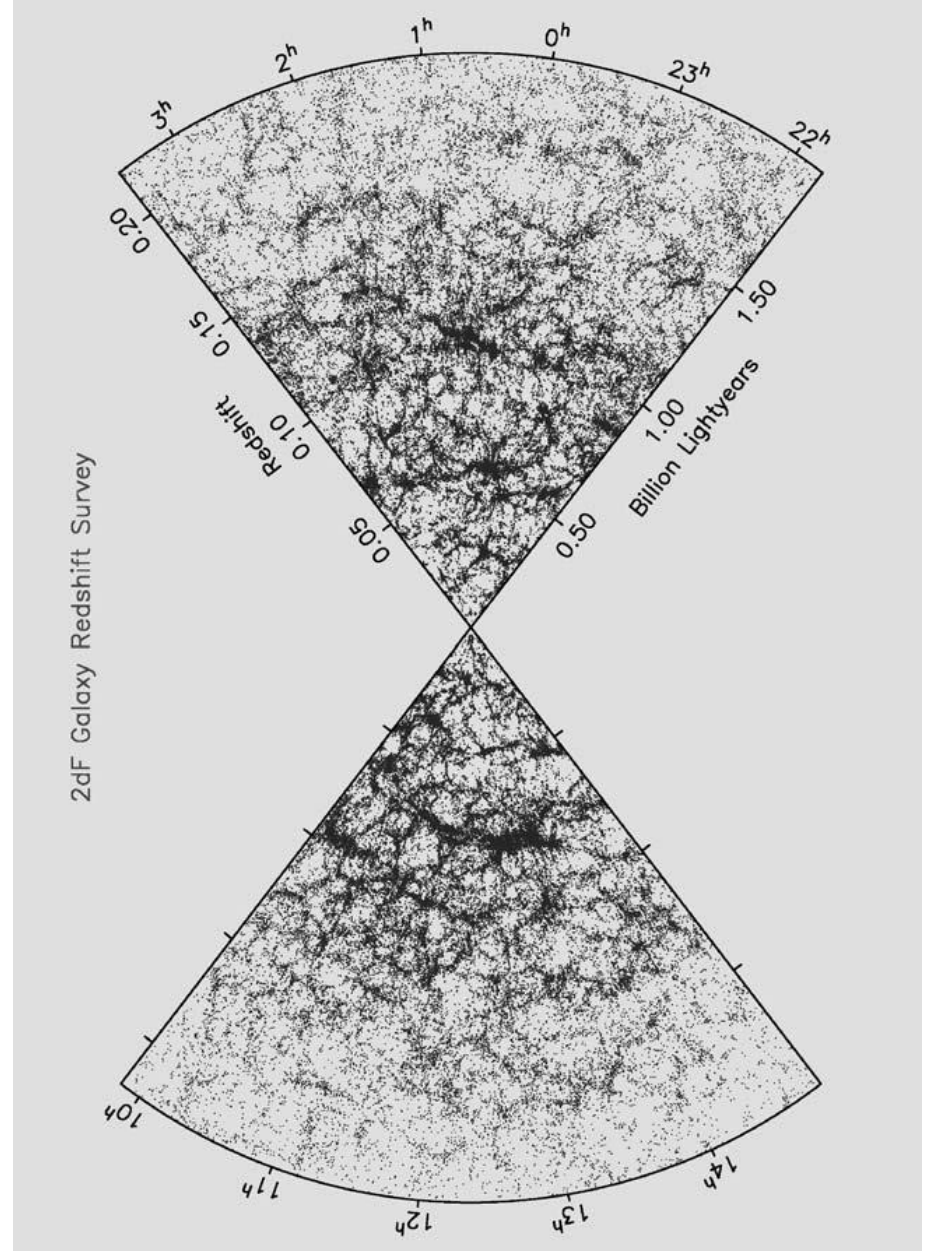
(Fig. 24.17, Astronomy Today).

La estructura a gran escala

- El rasgo más sobresaliente de estos mapas es que **la distribución de galaxias en escalas muy grandes es definitivamente no aleatoria**.
- Las galaxias se ordenan según una red de “**filamentos**” que rodean grandes regiones de espacio relativamente vacías llamadas “**vacíos**”, como si estuvieran ubicadas sobre la superficie de enormes “**burbujas**” (los “vacíos” serían los interiores de tales “burbujas”).
- Los “vacíos” más grandes serían del orden de 100 Mpc.
- Los cúmulos más densos y supercúmulos de galaxias (diámetros $\sim 10\text{-}20$ Mpc) se encontrarían en la convergencia de varias “burbujas” (los filamentos serían la intersección de las “rebanadas” observadas con las superficies de “burbujas”).
- El Universo es **homogéneo** e **isotrópico** a las mayores escalas (> 100 Mpc).
- La mayoría de los teóricos cree que toda la estructura a gran escala se vincula directamente a las condiciones prevalentes en las etapas más tempranas del universo.

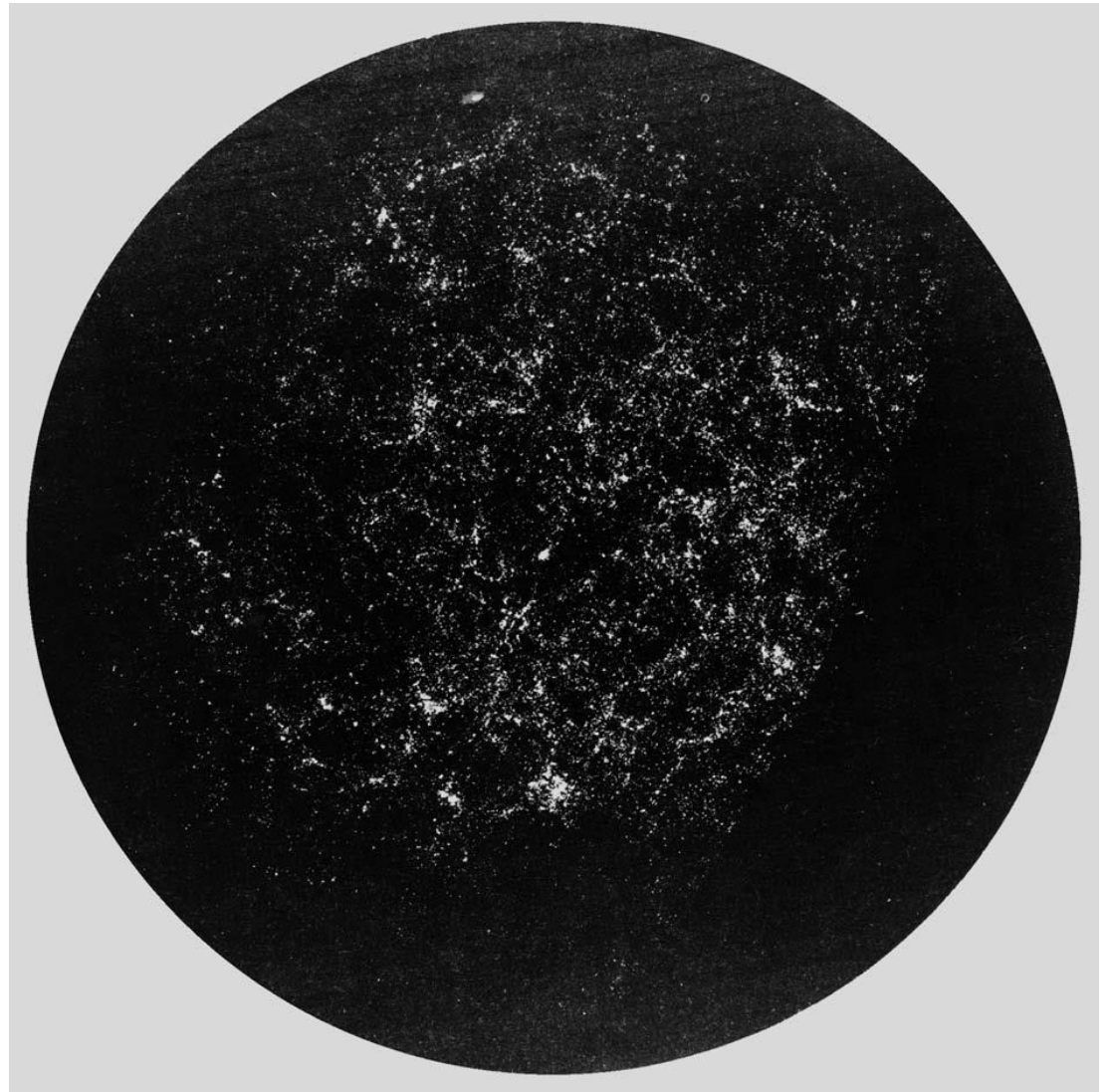
La distribución a gran escala de 245591 galaxias.

·La coordenada radial es el corrimiento al rojo (z), que se traduce en distancia mediante la ley de Hubble. El espesor de las “rebanadas” es de unos 10° (<http://www2.aao.gov.au/TDFgg>, fig. 18.14, karttunen).



No existirían estructuras en el universo en escalas mayores a unos 200 Mpc.

Fig. 19.8, Karttunen. The galaxies seem to be distributed in a “foamlike” way. Dense strings and shells are surrounded by relatively empty regions. (Seldner, M. et al. (1977): *Astron. J.* 82, 249)



El principio cosmológico

·La cosmología moderna se apoya en el principio cosmológico, el cual parece ser consistente con las observaciones: “el universo es **homogéneo e isotrópico**” (a escalas de cientos de Mpc).

·**Homogeneidad**: el universo luce igual independientemente del lugar desde donde lo observe.

·**Isotropía**: el universo luce igual independientemente de la dirección según la cual lo observe.

·Implica que el universo no tiene un *fin* (“borde”), ni un *centro*.

El principio cosmológico

Fig. 19.7, Fundamental Astronomy 5th. Ed. The cosmological principle. In the small circle (A) about the observer (O) the distribution of galaxies does not yet represent the large-scale distribution. In the larger circle (B) the distribution is already uniform on the average

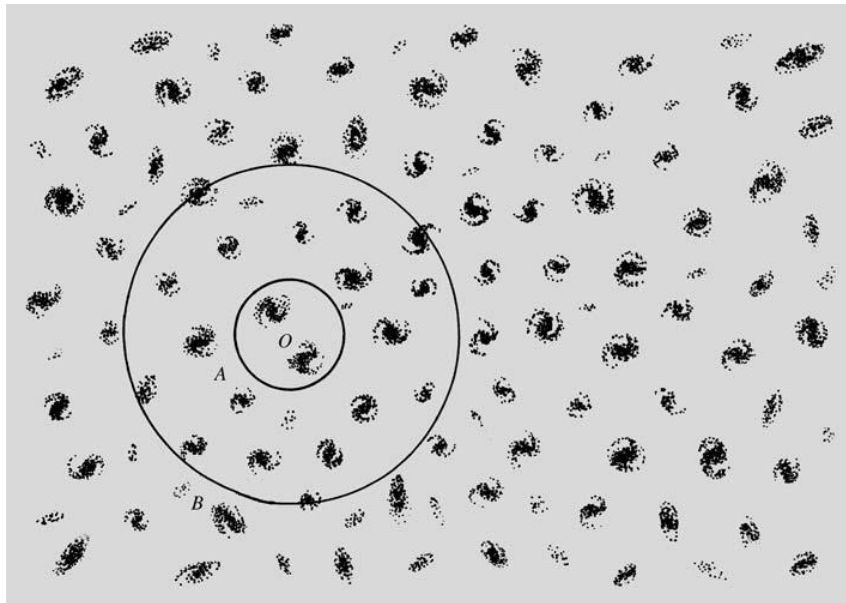
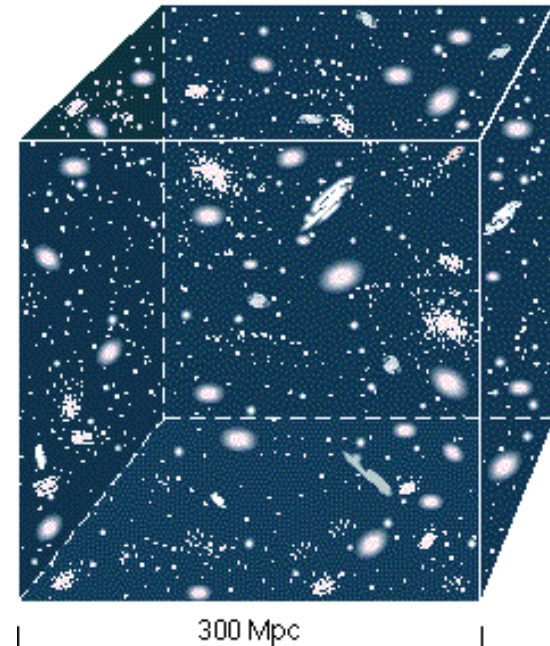


Figure 26.2, Astronomy Today. Diagram of galaxies contained within an enormous cube, 300 Mpc on a side. Cosmologists believe that the contents of such a cube would look pretty much the same no matter where we placed the cube in the universe. El número de galaxias encerradas sería el mismo, o sea unas 100000, exceptuando las más débiles (enanas elípticas y las irregulares).



La paradoja de Olbers

.Cada noche que miramos al cielo y notamos su oscuridad, estamos realizando una observación cosmológica, tan simple como profunda.

.Si el universo fuera homogéneo, isotrópico, infinito e invariante, en cualquier dirección que observemos, nuestra visual debería encontrarse con una estrella.

.En consecuencia, el cielo nocturno debería ser brillante en toda su extensión (cada punto del cielo debería brillar como la superficie del Sol, dado que el brillo superficial no depende de la distancia).

.(Fig. 26.3, *Astronomy Today*).

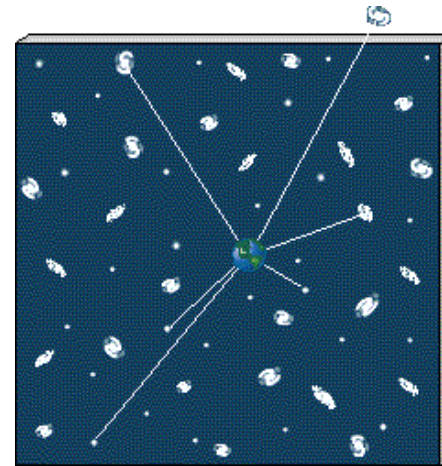
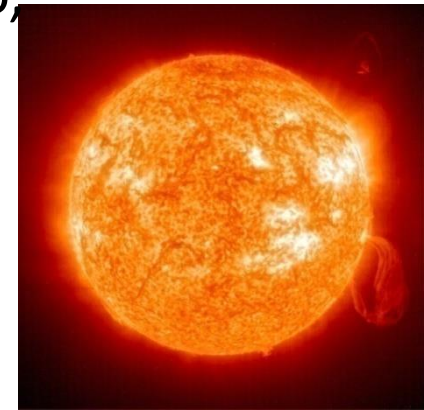


Fig. 19.1, *Fundamental Astronomy 5th. Ed.* The Olbers paradox. A two-dimensional analogy can be found in an optically thick pine forest where the line of sight meets a trunk wherever one looks. (Photo M. Poutanen and H. Karttunen)

La paradoja de Olbers

- La diferencia obvia entre esta predicción y la apariencia real del cielo nocturno se conoce como la paradoja de Olbers, gracias a Heinrich Olbers (S. XIX), quien popularizó una idea que ya había sido notada en el S. XVI por Thomas Digges, y en el S. XVII por Johannes Kepler, entre otros astrónomos.
- La explicación moderna es que las estrellas solamente han existido por un tiempo finito, de forma que la luz de las estrellas muy distantes aún no ha tenido tiempo de alcanzarnos: el universo podría ser infinito, pero debe tener una edad finita.
- Además, el universo ha evolucionado con el tiempo.



La teoría del *Big Bang*

.Si suponemos que la velocidad de recesión de las galaxias ha permanecido constante en el tiempo, aplicando la ley de Hubble podríamos calcular el tiempo que le ha llevado a una galaxia dada alcanzar su distancia actual:

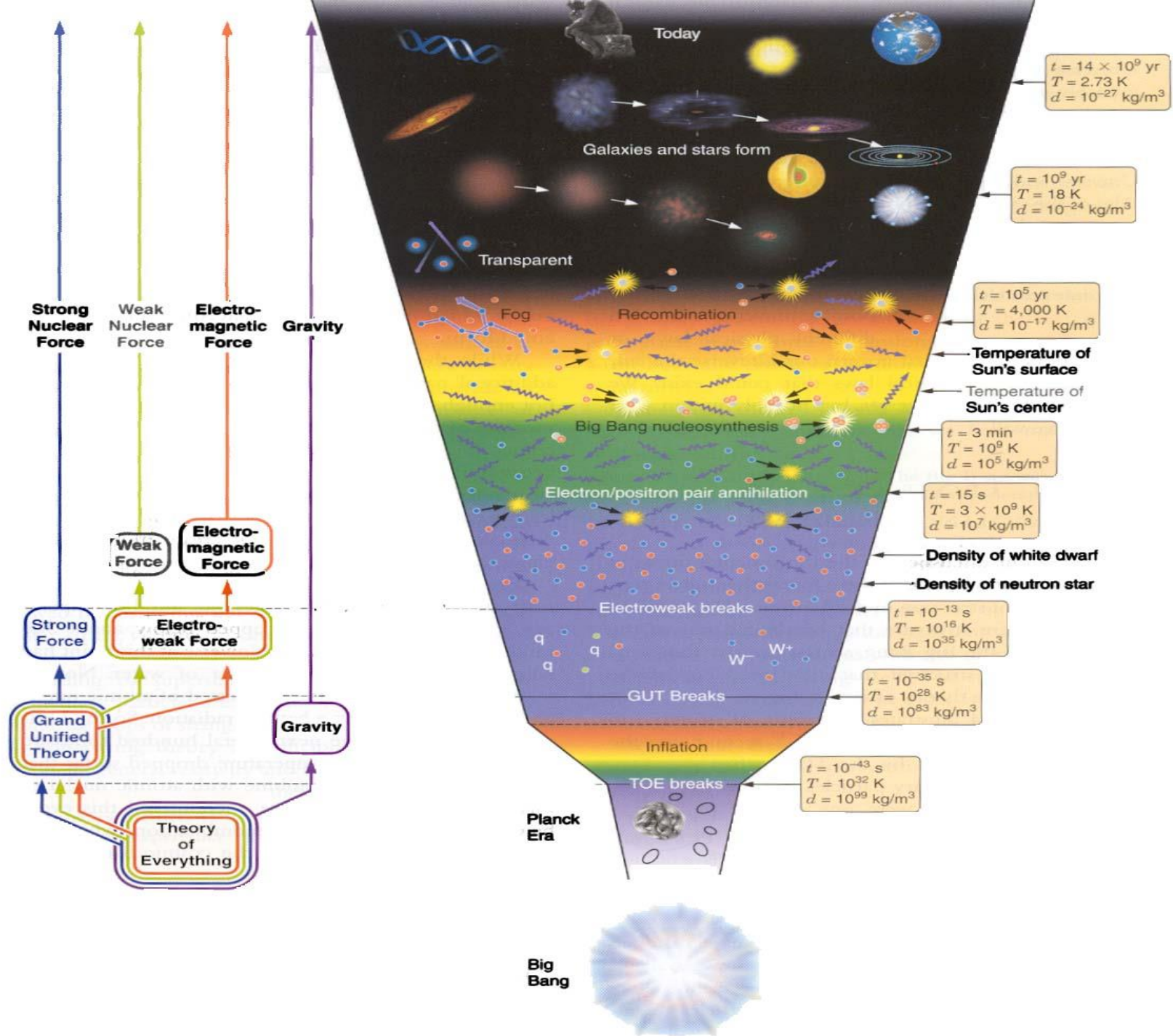
$$\text{tiempo} = \frac{\text{distancia}}{\text{velocidad}} = \frac{\text{distancia}}{H_0 \times \text{distancia}} = \frac{1}{H_0}$$

El “Big Bang”

- .El “Big Bang” fue una singularidad en el espacio-tiempo: un instante donde las leyes actuales de la física nos dicen que el universo tenía tamaño nulo, y temperatura y densidad infinitas.
- .En tales condiciones extremas, las predicciones de la relatividad general fallan.
- .Al presente no existe una teoría para explicar ese “instante”.
- .La física actual puede describir el universo a partir de $\sim 1\text{E}-43$ s luego del Big Bang.

El “Big Bang”

- ¿Cuales fueron las condiciones prevalentes en los primeros segundos del universo, y cómo esas condiciones dieron lugar al universo que vemos hoy?
- En el comienzo el universo consistía de energía pura, a temperaturas inimaginablemente altas.
- A medida que se fue expandiendo y enfriando, de la energía fueron surgiendo las partículas elementales, luego los núcleos atómicos, luego los átomos, y finalmente las estructuras que vemos hoy.



La Radiación de Fondo Cósmica (CMB = Cosmic Microwave Background)

- Descubierta por Penzias y Wilson en 1965 usando una antena de los laboratorios Bell.
- Encontraron una radiación de fondo isotrópica en la región de microondas.
- Observaciones posteriores con el satélite COBE mostraron que la CMB se ajusta notablemente bien con la distribución espectral de energía de un cuerpo negro a $T = 2.725 \pm 0.001$ K. La energía media de los fotones del CMB corresponde a una longitud de onda de unos 2 mm.
- La existencia del CMB fue la prueba determinante a favor del modelo del Big Bang.
- Según la teoría del Big Bang, en el universo primigenio la materia bariónica se encontraba muy caliente y densa, y por tanto ionizada, poblado de electrones libres.
- El CMB puede ser entonces entendido como una reliquia de la época en que el universo era lo suficientemente caliente y denso como para ser opaco. Con la expansión del universo, dicha radiación se fue enfriando hasta alcanzar su valor actual ≈ 3 K.

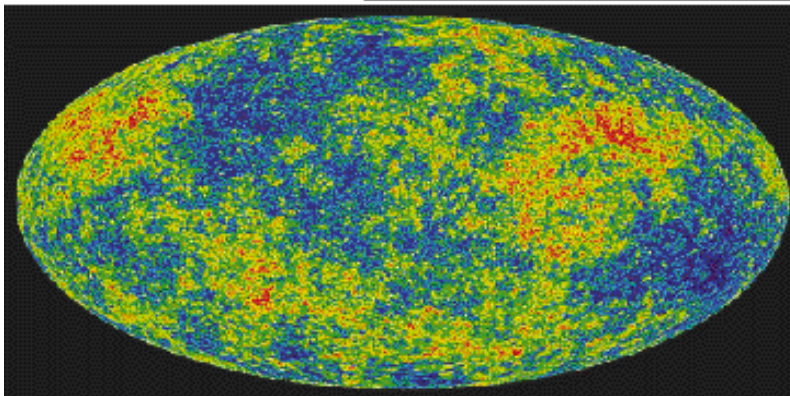
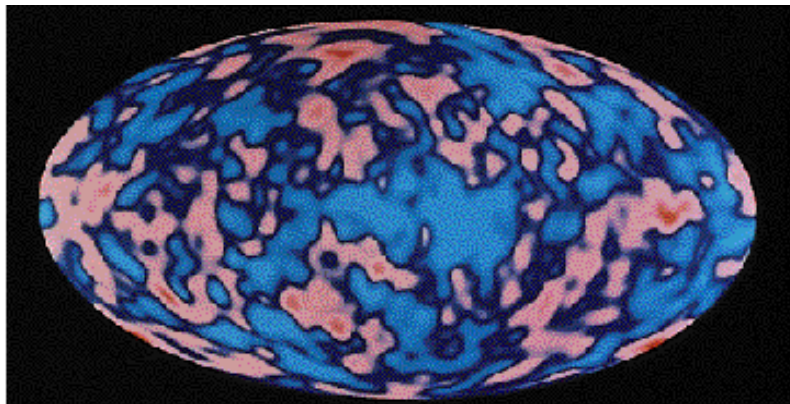
La Radiación de Fondo Cósmica (CMB = Cosmic Microwave Background)

- La existencia del CMB fue la prueba determinante a favor del modelo del **Big Bang**.
- Según la teoría del Big Bang, en el universo primigenio la materia **bariónica** se encontraba muy caliente y densa, y por tanto ionizada, poblado de electrones libres.
- El CMB puede ser entonces entendido como una **reliquia** de la época en que el universo era lo suficientemente caliente y denso como para ser opaco.
- Con la expansión del universo, dicha radiación se fue enfriando hasta alcanzar su valor actual ≈ 3 K.

El CMB

· Los modelos de materia oscura predicen pequeñas fluctuaciones ($\sim 10 \mu\text{K}$) en el CMB debido al corrimiento al rojo gravitacional.

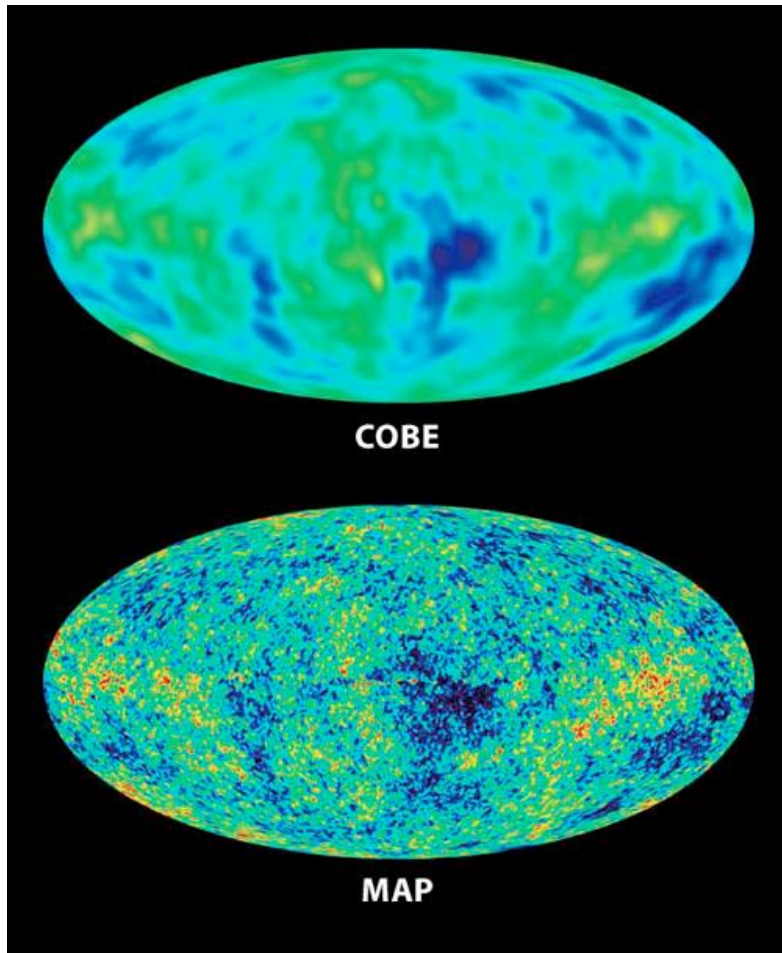
· En 1992 el satélite COBE pudo detectar (con esfuerzo) esas fluctuaciones predichas (luego de restada la variación en temperatura debida al movimiento de la Tierra, así como la emisión en radio de la Vía Láctea).



(b)

· Figure 27.16 (a) COBE map of temperature fluctuations in the cosmic microwave background. Hotter-than-average regions are shown in red, cooler-than-average regions in blue. The total temperature range shown is ± 200 millionths of a kelvin. (b) Simulated map of microwave background temperature fluctuations corresponding to the simulation shown in Figure 27.15. Dark blue and red represent temperature variations of ± 200 millionths of a kelvin from the average, so this map can be compared more or less directly with the COBE map in part (a). However, the resolution here is about 0.5° —20 times sharper than the COBE map, and roughly the resolution expected in the next generation of satellite observations.

Resultados del WMAP



- Las primeras estrellas se formaron 200 millones de años luego del Big Bang.
- La radiación cósmica de fondo se originó 379,000 años después del Big Bang.
- $H_0 = 71 \pm 4 \text{ km/sec/Mpc}$

Los primeros átomos y el **desacople** entre la **radiación** y la **materia normal**.

- .Cuando los átomos se formaron, el universo se volvió transparente a la radiación.
- .Ocurrió unos pocos miles de años luego del Big Bang, en la Era de la Materia.
- .En el comienzo de la época atómica, la materia consistía en electrones, protones, núcleos de He y materia oscura.
- .La temperatura era de unas decenas de miles de K, aún demasiado alta para que átomos de H pudieran existir.
- .Durante los próximos cientos de miles de años el universo se expandió por un factor 10, y la temperatura descendió a unos pocos miles de K, y los electrones y núcleos pudieron combinarse para formar átomos neutros.
- .Antes, cuando la materia estaba ionizada, el universo estaba llenos de electrones libres, que interactuaban con la radiación de todas las longitudes de onda.

Los primeros átomos y el **desacople** entre la radiación y la materia normal.

- .Como resultado, un fotón no podía viajar sin encontrarse con un electrón y resultar dispersado: el universo era **opaco** a la radiación.
- .Al combinarse luego los electrones con los núcleos, los átomos resultante interactuaban con la radiación de ciertas longitudes de onda, dejando libres a los fotones de otras longitudes de onda, quienes pudieron viajar sin ser absorbidos: el universo se volvió **transparente**.
- .Al seguir expandiéndose el universo, la radiación siguió enfriándose hasta convertirse en el CMB que vemos hoy.
- .Los fotones del CMB que hoy estamos observando han estado viajando desde la época del desacople.

Tipos de partículas elementales

.Sustancias básicas: *elementos*

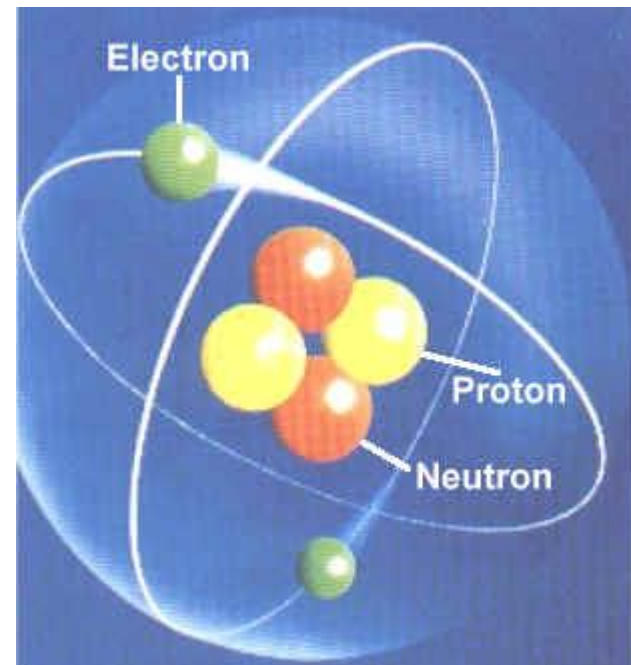
.Los elementos son distintas especies de átomos

.Átomos constituidos por:

–Núcleo: protones (p^+) + neutrones (n^0)

–Electrones (e^-)

.Toda la materia ordinaria constituida por estas tres partículas.



Propiedades básicas de las partículas

Bariones {	Protón	p	938.3	+1
	Neutrón	n	939.6	0
Leptones {	Electrón	e ⁻	0.511	-1
	Neutrino	ν_e, ν_μ, ν_τ	?	0
	Fotón	γ	0	0
	Materia Oscura	?	?	0

Quarks y leptones

Quarks

- up quark — charge = $2/3$
- down quark — charge = $-1/3$

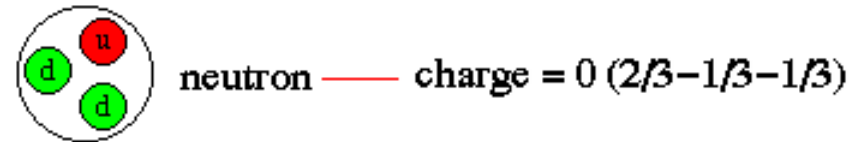
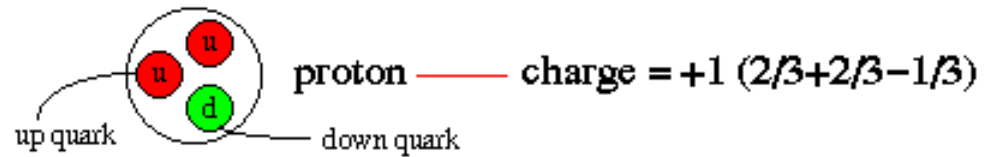
Leptons

- electron — charge = -1 , lightest particle
- neutrino — low mass, no charge, weak interacting

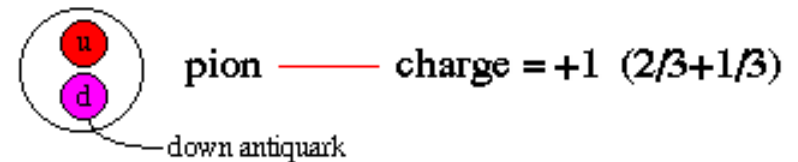
Leptons	ν_e e- Neutrino	ν_μ μ - Neutrino	ν_τ τ - Neutrino
	e electron	μ muon	τ tau
	I II III The Generations of Matter		
Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom

Atomic Nuclei = Combinations of Quarks

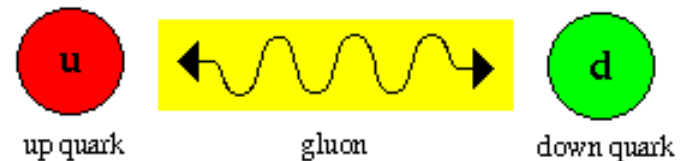
Baryons = particles made of 3 quarks



Mesons = particles made of 2 quarks



What binds quarks together?



the strong force carried by gluons

El triunfo de la materia

- La producción por pares fue responsable directa de toda la materia que existe hoy en el universo.
- Por alguna razón, hubo un ligero exceso de materia sobre la antimateria (1 parte en 109).
- Todo lo que conocemos esta formado por la esa pequeña parte de materia en exceso!**
- Los protones y neutrones se “condensaron” en $t = 0.0001 \text{ s}$ ($T < 1E13 \text{ K}$). Los electrones lo hicieron al minuto ($T < 1E9 \text{ K}$).
- La etapa de “creación de materia” del universo terminó al aparecer los electrones (las partículas elementales más ligeras).
- A partir de ahí, la materia evolucionó aglomerándose en estructuras cada vez más complejas, formando eventualmente los átomos, planetas, estrellas, galaxias, y la estructura a gran escala que hoy vemos. **Toda la materia se formó en los primeros segundos de vida del universo.**

Resumen de la Historia del Universo

Epoca	Tiempo	Densidad [g/cm ³]	Temperatura (K)	Evento
Big Bang	0	~ infinitamente alta	Extremadamente alta	Origen del Universo
Planck	$<10^{-43}$	$>10^{94}$	$>10^{32}$	Era de Cosmología cuántica donde el Universo ocupaba el tamaño de un nucleón
Quark	$<10^{-23}$ s	$>10^{55}$	$>10^{22}$	Poblado densamente con quarks libres
Hadron	$<10^{-4}$ s	$>10^{14}$	$>10^{12}$	Aniquilación de materia y antimateria
Lepton	10^{-4} s a 1 s	10^{14} - 10^5	10^{12} - 10^{10}	Rápida expansión y enfriamiento; equilibrio térmico de electrones, positrones, neutrinos y fotones
Radiación	1 s to 10^6 a	# 10^5 - 10^{-22}	10^{10} - 3000	Formación de Helio y Deuterio; la radiación se desacopla de la materia al finalizar la era
Materia	$>10^6$ a	$<10^{-22}$	<3000 &	Condesación de quasars y cúmulos de galaxias
Presente	15 - 20×10^9 a	5×10^{-30} - 5×10^{-31}	3 &	Se han formado galaxias y estrellas; estrellas todavía en formación

Al comienzo de la era de la radiación era, cuando el Universo tenía 1 s de edad y $T = 10^{10}$ K, la densidad de radiación era de 10^5 g/cm³, mientras que la densidad de materia de sólo 0.1-1.0 g/cm³

& La temperatura de la radiación cósmica de fondo, que no esta más acoplada con la materia y su temperatura

La materia oscura

·La materia oscura es una componente masiva del universo que no emite, ni absorbe, ni difunde luz.

·Si los neutrinos tuvieran masa, serían candidatos a materia oscura.

·La materia oscura se detecta a través de su efecto gravitacional en la materia luminosa (estrellas, galaxias).

Galaxias y materia oscura

·La materia oscura se conoce por su efecto en la materia visible.

·En 1933 **Fritz Zwicky** estudiaba grupos de galaxias (las mayores concentraciones de materia en el universo).



Galaxias y materia oscura

.Zwicky descubrió que las galaxias parecían moverse demasiado rápido para que el grupo se mantuviera unido, y que la masa visible (estrellas, gas y polvo) no era suficiente.

.Dedujo la existencia de una componente del universo invisible, que no emitía ni absorbía radiación electromagnética.

.Su descubrimiento permaneció ignorado por 45 años.



Galaxias y materia oscura

•En 1970, **Vera Rubin** empezó a estudiar los movimientos en la galaxia de Andrómeda.

•Ella esperaba que el movimiento fuera mas rápido en el centro, y más lento en los extremos, pero no resultó así.

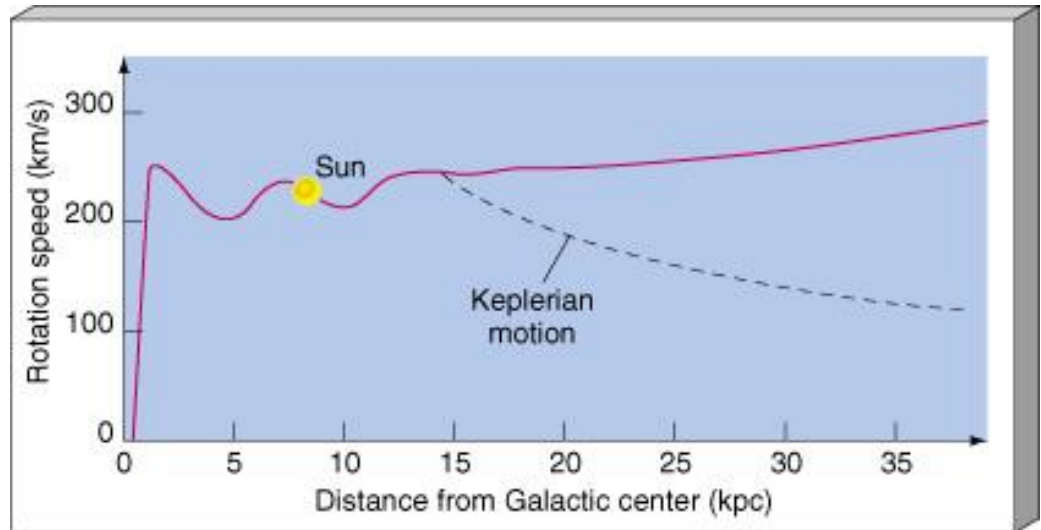


Fig. 23.19, Astronomy Today. The rotation curve for the Milky Way Galaxy plots rotation speed versus distance from the Galactic center. We can use this curve to compute the mass of the Galaxy that lies within any given radius. The dashed curve is the rotation curve expected if the Galaxy "ended" abruptly at a radius of 15 kpc, the limit of most of the known spiral structure and the globular cluster distribution. The fact that the red curve does not follow this dashed line, but instead stays well above it, indicates that there must be additional matter beyond that radius.

Curvas de rotacion galacticas

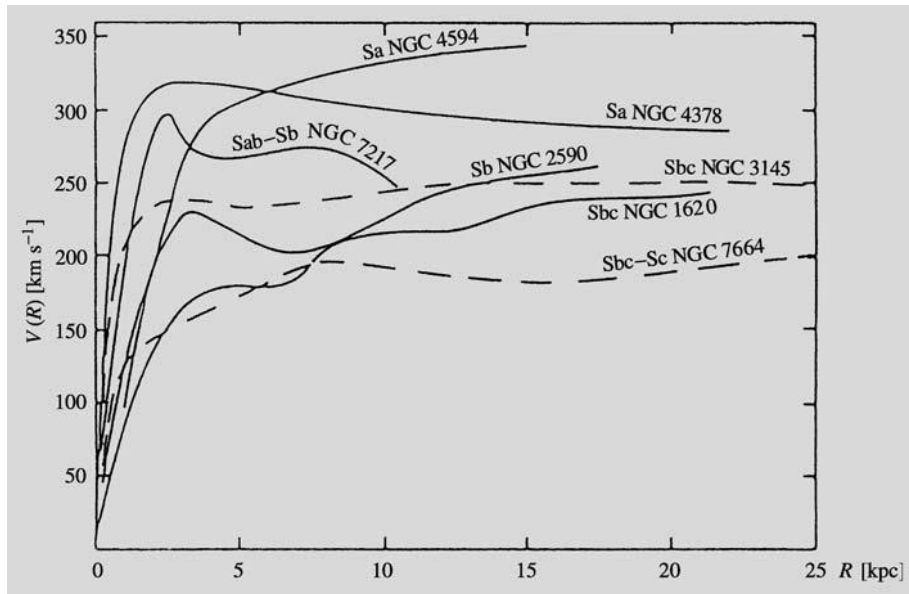


Fig. 18.9, Karttunen. Rotation curves for seven spiral galaxies (Rubin, V.C., Ford, W.K., Thonnard, N. (1978): *Astrophys. J. (Lett.)* 225, L107).

·Si la mayor parte de la materia en la galaxia estuviera contenida dentro de los límites de la estructura visible, las leyes del movimiento de Newton predicen que las velocidades orbitales de las estrellas y del gas debería disminuir con la distancia al centro galáctico.

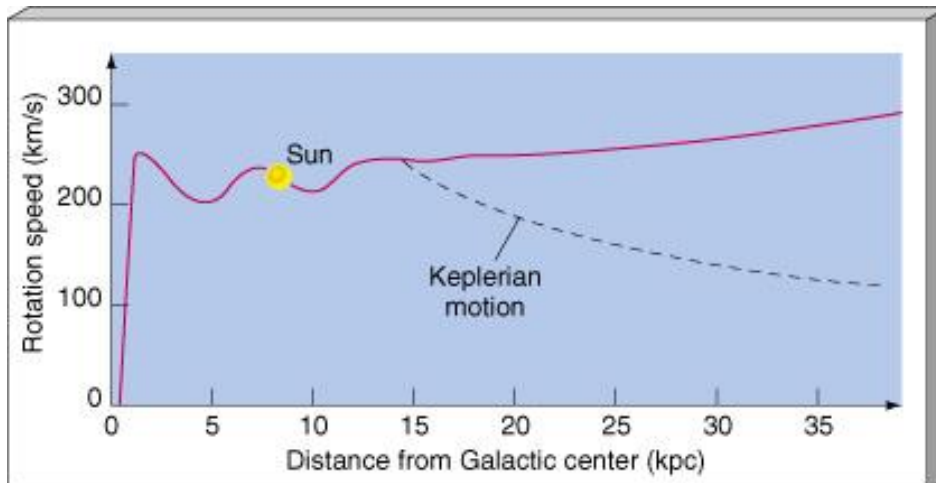
·Pero se observaba que la velocidad tendía a ser constante.

Curvas de rotación galácticas



.Si la mayor parte de la materia en la galaxia estuviera contenida dentro de los límites de la estructura visible, las leyes del movimiento de Newton predicen que las velocidades orbitales de las estrellas y del gas más allá de 15 kpc debería disminuir con la distancia al centro galáctico.

.Pero lo que se observa es que la velocidad se mantiene constante a grandes distancias (no se aprecia la caída kepleriana debida a una masa central).



. Se deduce la existencia de un **halo muy extendido de materia oscura** formando parte de las galaxias (se estima que hasta un 95 % de la masa total de una galaxia espiral sería materia oscura).

Galaxias y materia oscura

- .Vera Rubin confirmó la existencia de la materia oscura estudiando las curvas de rotación galácticas.
- .Hoy sabemos que todas las galaxias están rodeadas por un halo de materia oscura.



• **No se conoce su naturaleza.** Entre los posibles candidatos se han sugerido:

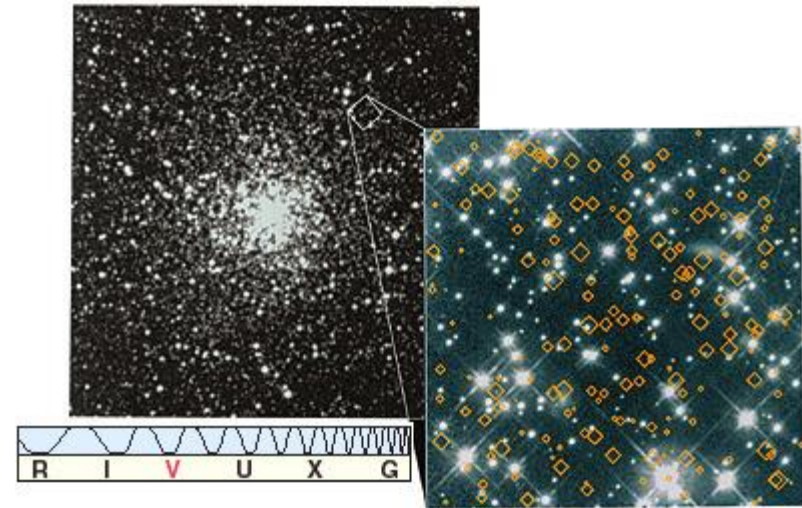
–Estrellas de baja masa: enanas rojas o marrones (e incluso objetos tipo Júpiter poblando el espacio).

–Enanas blancas, estrellas neutrónicas, o agujeros negros.

–Los objetos anteriores también se conocen como MACHOs (“Massive Compact Halo Objects”). Se han buscado por sus efectos de micro-lentes gravitacionales , y se han encontrado demasiado pocos.

–**Materia NO BARIONICA** (WIMPs). Se trataría de materia que no interactúa con la radiación electromagnética (por lo que solamente se puede detectar por métodos gravitacionales), y que estaría formada por partículas “exóticas” (partículas subatómicas remanentes de la formación del universo) .

La materia oscura



• Fig. 23.20, Astronomy Today. Very sensitive visible observations with the Hubble Space Telescope have apparently ruled out faint red-dwarf stars as candidates for dark matter. The object shown here, the globular cluster NGC 6397, is one of many regions searched in the Milky Way. The inset, 0.4 pc on a side, shows a high-resolution Hubble view. The scores of diamonds have been overlaid at positions where red dwarfs might (statistically) have been expected if they did indeed make up the dark matter, but they were not found.

La Distancia de Hubble y la Distancia Horizonte

.Si la densidad de energía del universo estuviera dominada por la llamada **constante cosmológica**, entonces la fuerza de gravedad dominante sería **repulsiva**, y el universo sería más viejo que el tiempo de Hubble.

.La **distancia de Hubble** se define como: $r_H = c/H_0$. Vale 4300 Mpc para $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$.

.La distancia horizonte se define como la mayor distancia que puede recorrer un fotón durante la vida del universo.

.Es $\approx c/H_0$, y el valor exacto depende (al igual que la edad del universo) de la historia evolutiva del universo.

La Radiación de Fondo Cósmica (CMB = Cosmic Microwave Background)

- Descubierta por Penzias y Wilson en 1965 usando una antena de los laboratorios Bell.
- Encontraron una **radiación de fondo isotrópica** en la región de **microondas**.
- Observaciones posteriores con el **satélite COBE** mostraron que la CMB se ajusta notablemente bien con la distribución espectral de energía de un cuerpo negro a **$T = (2.725 \pm 0.001) \text{ K}$** . La energía media de los fotones del CMB corresponde a una longitud de onda de unos 2 mm.

La Energía Oscura

- Actualmente, las observaciones indican que la expansión del universo tiene una aceleración positiva.**
- Para que esto ocurra debe existir una fuerza que se oponga a la gravedad.
- El principal candidato sería la **energía del vacío** (energía asociada con la generación espontánea y aniquilación de pares partícula-antipartícula en un espacio vacío).
- Propuestas alternativas:
 - Existiría una *quinta fuerza fundamental* (?)
 - Gravedad modificada* (?)
 - Las leyes de la relatividad general no serían válidas a escalas cosmológicas (?)

La Densidad Crítica

- El parámetro que determina la forma del Universo es el cociente entre la densidad de materia-energía, y la densidad de materia-energía mínima para frenar la expansión (*densidad crítica*). Se conoce como Ω .
- La masa-energía hacen que el espacio-tiempo se deformen o curven.
- Si $\Omega < 1$, el Universo se expande por siempre, adoptando la forma de una silla de montar, donde las líneas inicialmente paralelas divergen.
- Si $\Omega = 1$, el Universo se expande por siempre, pero apenas, y su forma será plana, conservando la geometría euclidiana.
- Si $\Omega > 1$, las líneas paralelas convergen y el Universo se curva sobre sí mismo, terminando en un colapso final.
- Las observaciones indican que $\Omega \sim 1$. Para que los modelos teóricos se ajustaran a las observaciones, se postuló la existencia de la Energía Oscura, predicha en cierta forma por Einstein.

Componentes del Universo y Modelo Cosmológico Estándar

Actualmente, el modelo de universo que mejor ajusta las observaciones es el de un universo en expansión, homogéneo e isotrópico, espacialmente plano, y que contiene radiación, materia (tanto normal como oscura), y energía oscura, en las siguientes proporciones:

–**Materia Normal** (interactúa con la radiación): **5%**

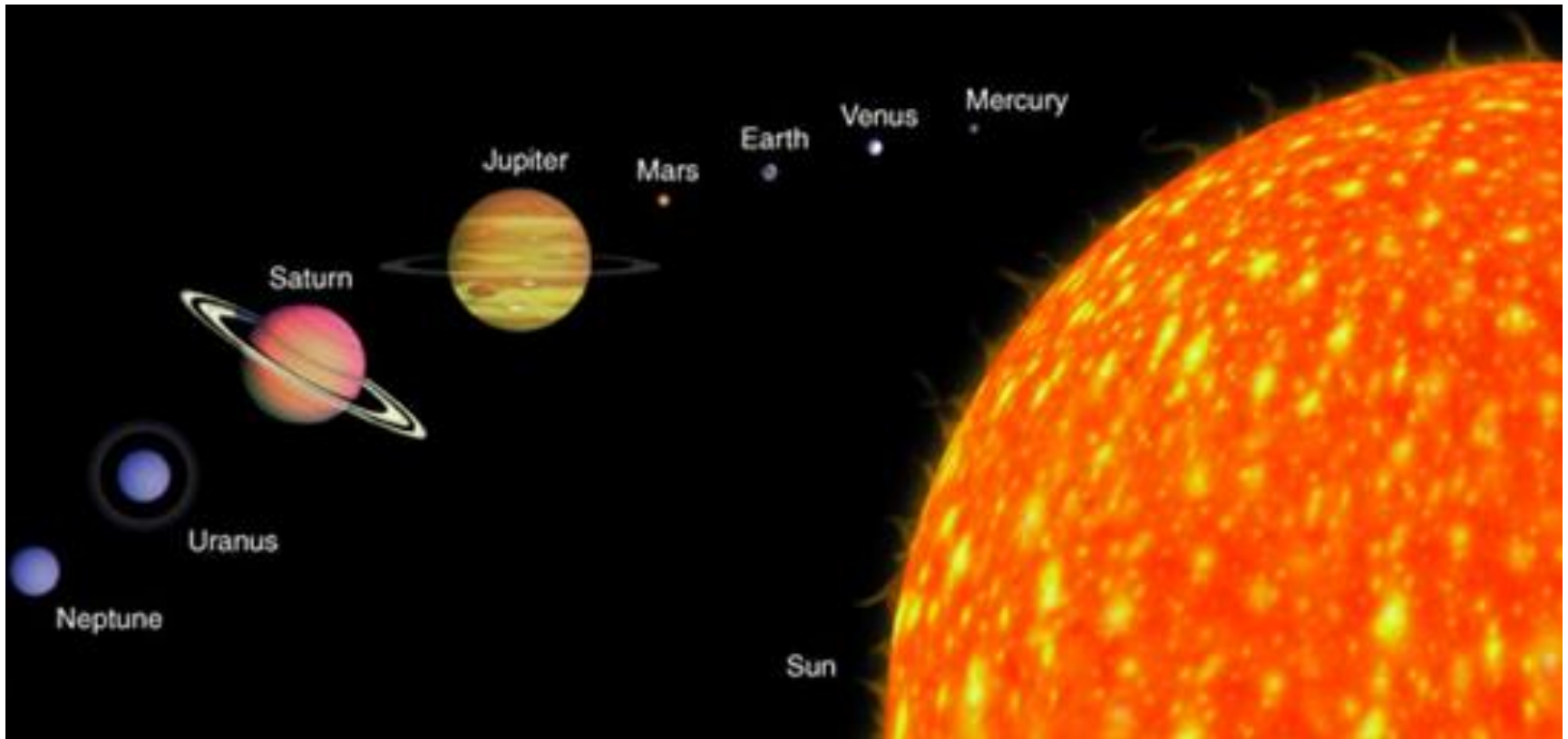
–**Materia Oscura** (se detecta únicamente por su efecto gravitacional en la materia normal): **27%**

–**Energía Oscura** (fuerza repulsiva que sería generada por el vacío, y que se opone a la fuerza atractiva de la gravedad): **68%**

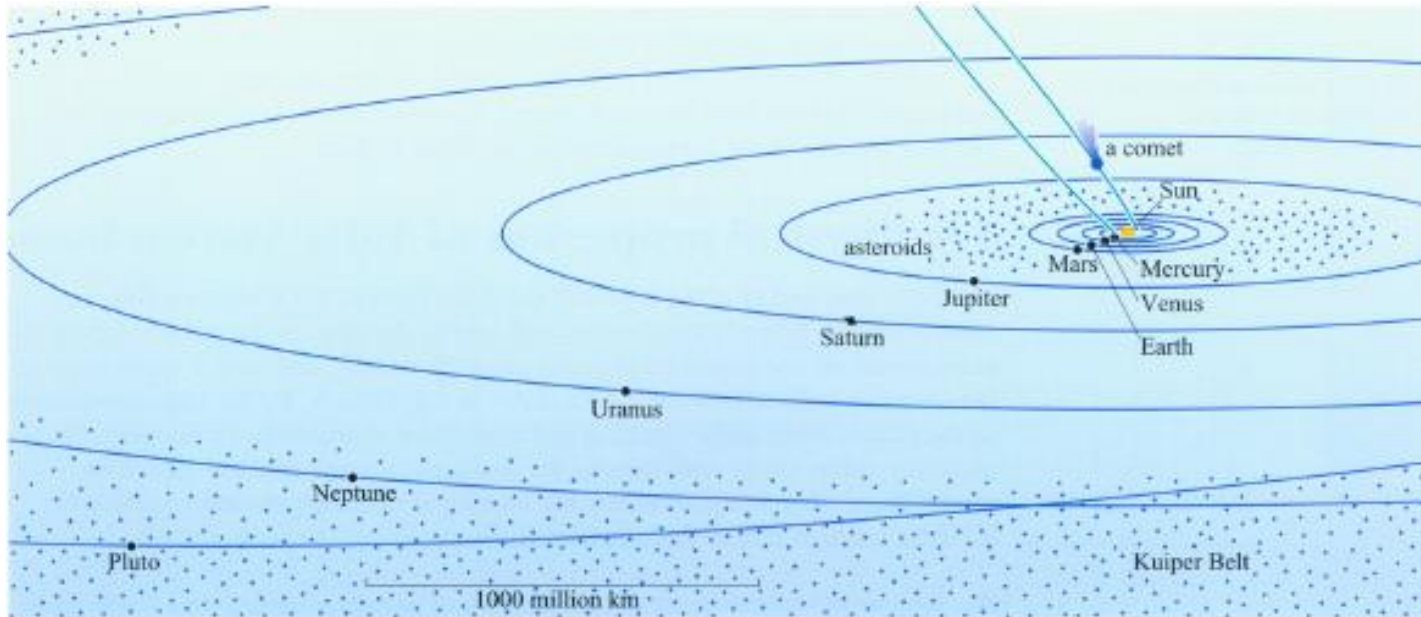
La Energía Oscura

- .Es otra de las grandes interrogantes planteadas en la actualidad.
- .En 1998 aparecen las primeras evidencias observacionales de que el universo se expande en forma acelerada.
- .Sólo puede explicarse postulando la existencia de otra componente del universo, un tipo de fuerza repulsiva opuesta a la gravitatoria.
- .Descifrar la naturaleza de la materia oscura y de la energía oscura son algunas de las cuestiones esenciales por resolver.

II - El Sistema Solar



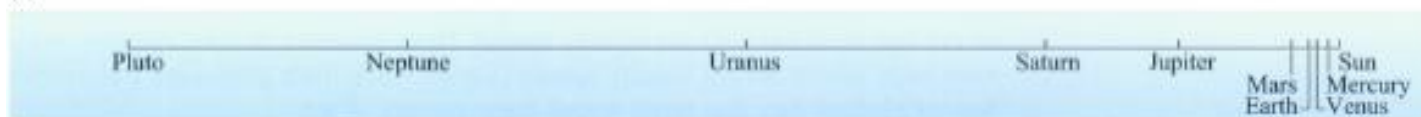
Características



(a)



(b)



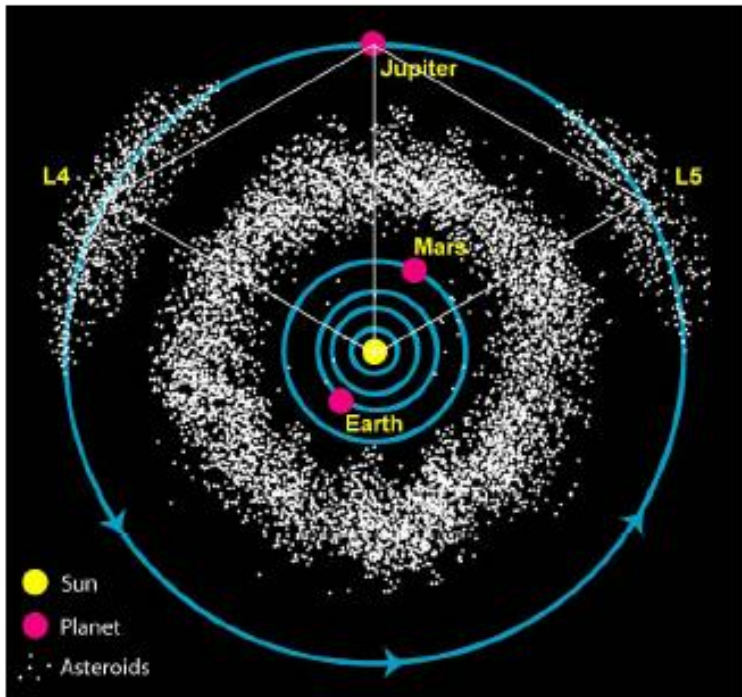
(c)

Propiedades Físicas y Orbitales de los planetas

Planeta	a (UA)	T (años)	Radio (km)	Masa (kg)	ρ (g/cm ³)	Per. Rotación	No.sat.
Mercurio	0,387	0,241	2439	$3,30 \times 10^{23}$	5,4	58,6 d	0
Venus	0,723	0,615	6052	$4,87 \times 10^{24}$	5,2	243,0	0
Tierra	1,000	1,000	6378	$5,97 \times 10^{24}$	5,5	23 h 56 m 4,1 s	1
Marte	1,524	1,881	3397	$6,42 \times 10^{23}$	3,9	24 h 37 m 22.7 s	2
Júpiter	5,203	11,86	71398	$1,9 \times 10^{27}$	1,3	9 h 55 m 30 s	63
Saturno	9,530	29,42	60000	$5,69 \times 10^{26}$	0,7	10 h 30 m	62
Urano	19,24	84,36	26320	$8,70 \times 10^{25}$	1,1	17 h 14 m	27
Neptuno	30,14	165,5	24300	$1,03 \times 10^{26}$	1,7	16 h 07 m	13

- * El Sol concentra el 99,9% de toda la masa del sistema solar.
- * Los 8 planetas se pueden clasificar en 2 grandes grupos: terrestres y jovianos o gigantes.
- * Tenemos además otras poblaciones de cuerpos menores: cometas, asteroides, objetos transneptunianos.

Cuerpos pequeños del sistema solar: asteroides



Localización espacial de los asteroides. Troyanos: se agrupan alrededor de los puntos de equilibrio dinámico L4 y L5

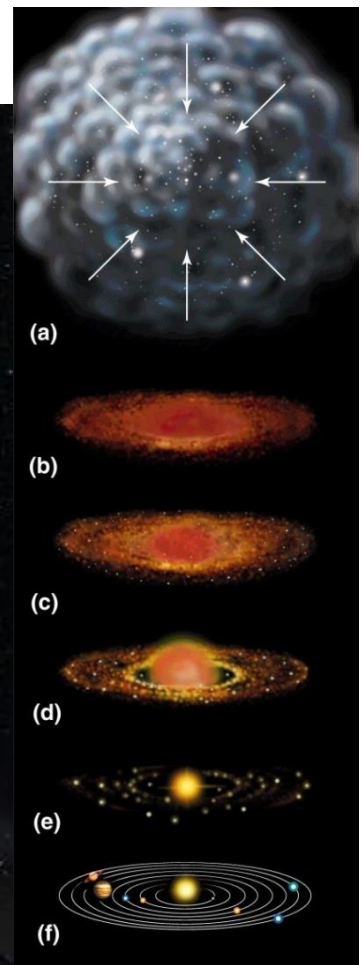


Muestra de asteroides: amplia gama de colores, formas y tamaños. Sólo Ceres es aproximadamente esférico.

- Hace unos 4600 millones de años, un disco de gas y polvo rodeaba a un Sol en formación....

- ... en el cual se formaron los *planetesimales*...

- ...y luego se formaron los planetas por *acreción*.



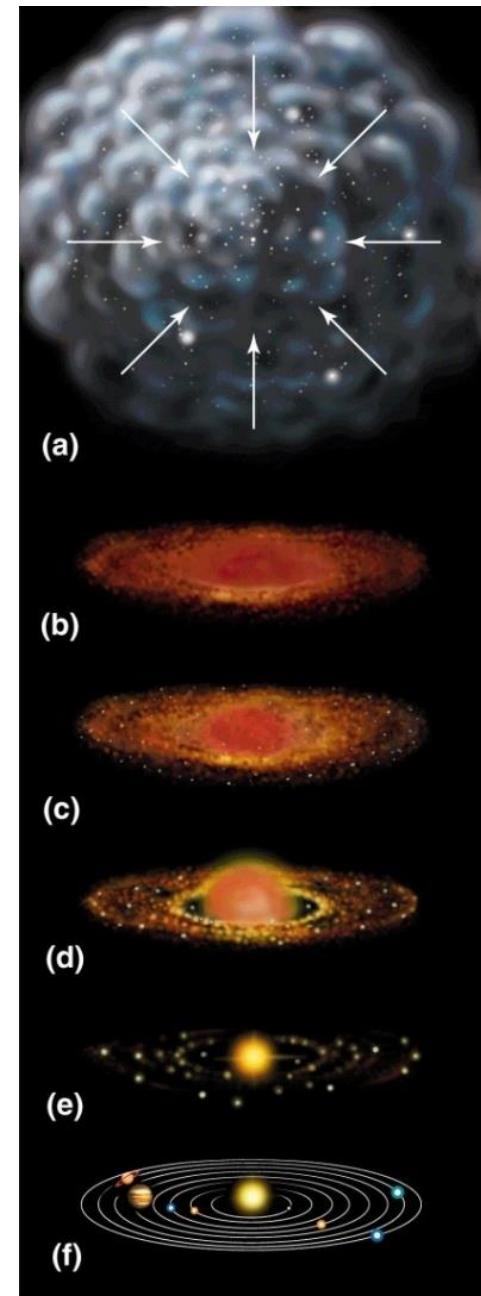
¿Cómo se forman las estrellas y los planetas?

S XVII: Kant y Laplace proponen una teoría para la formación del Sistema Solar a partir de la contracción de una nube de gas y polvo.

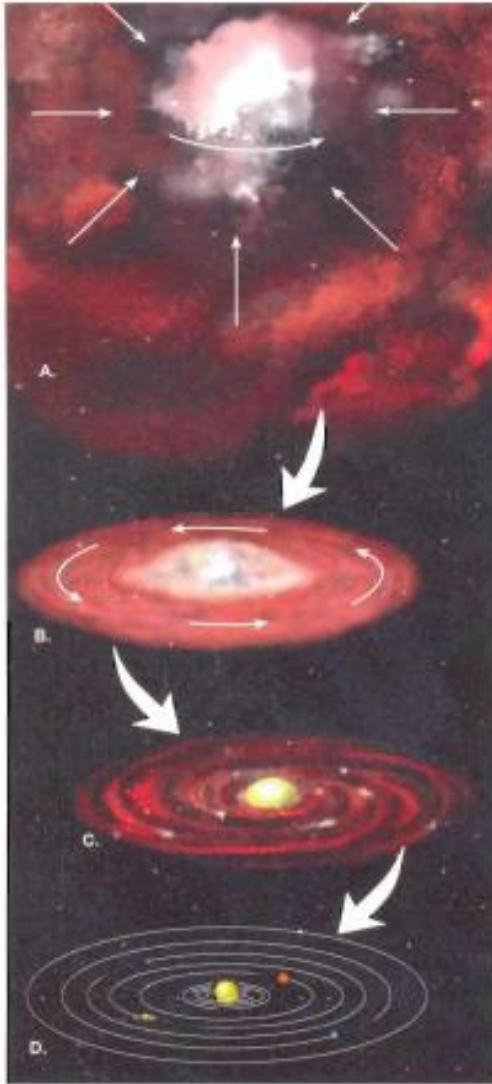
La “Hipótesis Nebular”:

–Explica la coplanaridad y la (cuasi) circularidad de las órbitas planetarias.

Si el Sol se formó de esta forma, entonces alrededor de otras estrellas también se podrían haber formado otros sistemas planetarios.



La formación del sistema solar



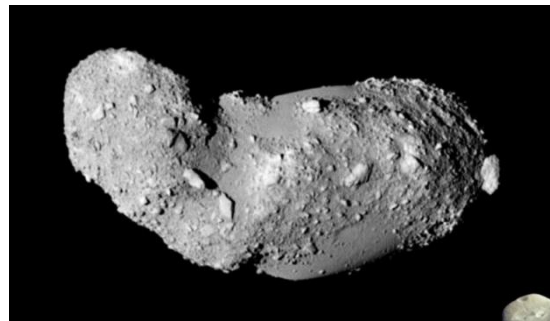
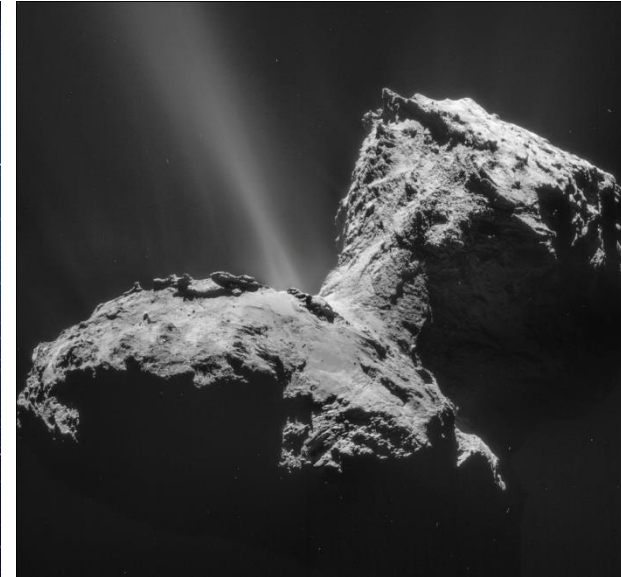
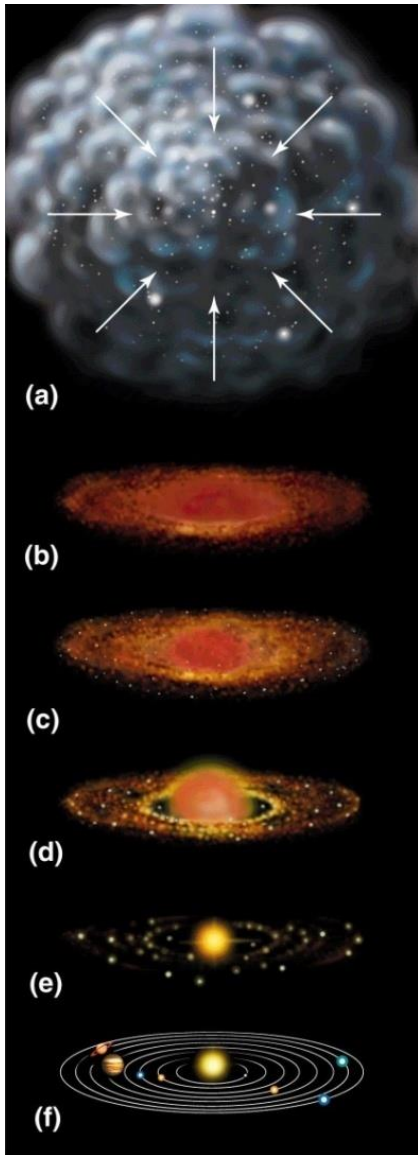
* El sistema solar se formó hace unos 4500 millones de años a partir de la contracción gravitacional de una nube de gas y polvo (teoría de Laplace).

* Por conservación de momento angular, la nube al contraerse rotará más rápidamente hasta llegar a la inestabilidad rotacional:

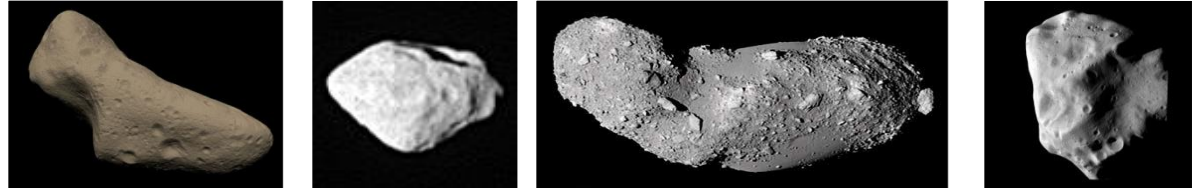
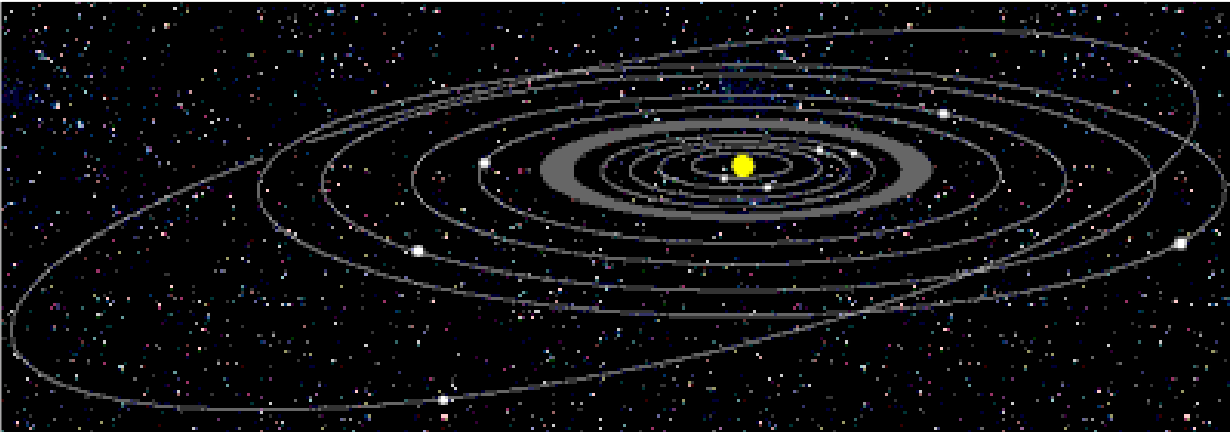
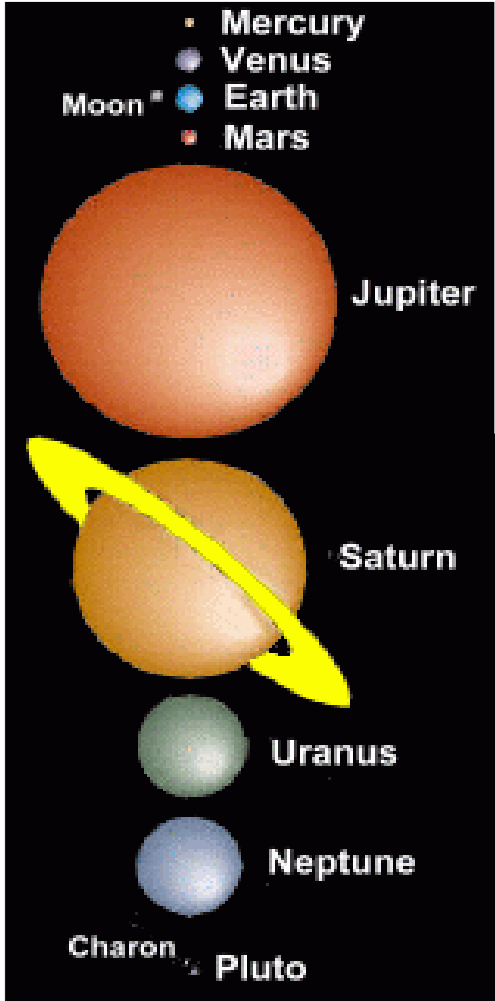
$$\frac{GM_{\odot}}{r^2} = \frac{v^2}{r}$$

⇒ desprendimiento de materia en el plano ecuatorial formando un disco de gas y polvo
⇒ condensación de pequeños núcleos sólidos (*planetesimales*) que luego se irán acumulando por un proceso de *acreción* hasta formar los planetas.

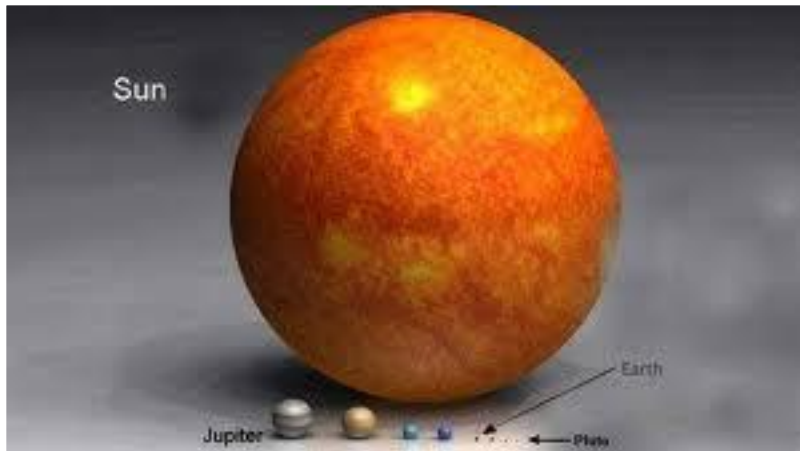
Cometas y Asteroides: residuos de la formación planetaria



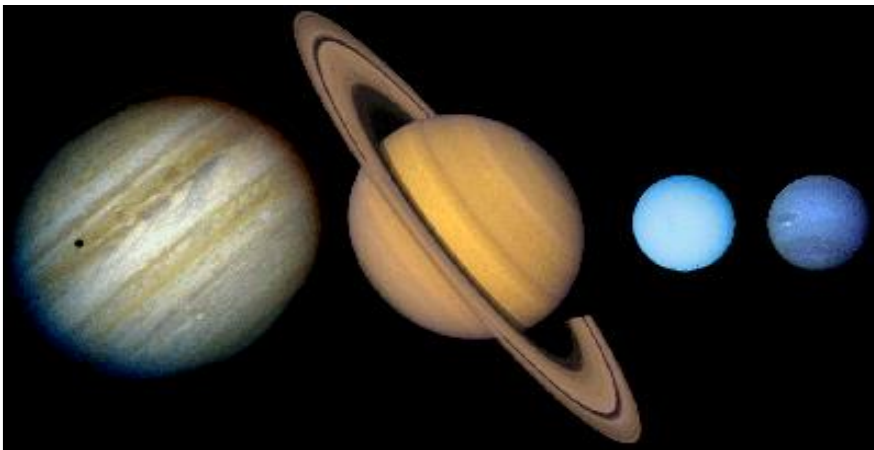
Nuestro Sistema Solar actual



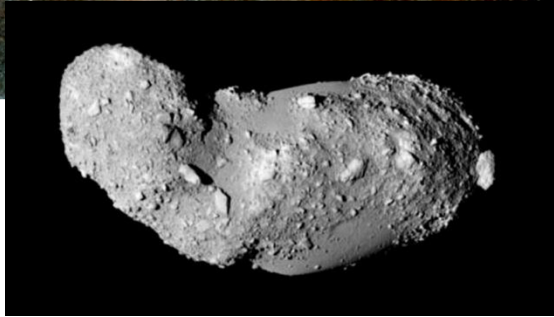
Inventario: 8 planetas y sus satélites (lunas), y grandes poblaciones de cuerpos menores (asteroides, cometas, objetos transneptunianos).



Terrestrial planets (rocks, density $\sim 4-5 \text{ g/cm}^3$)



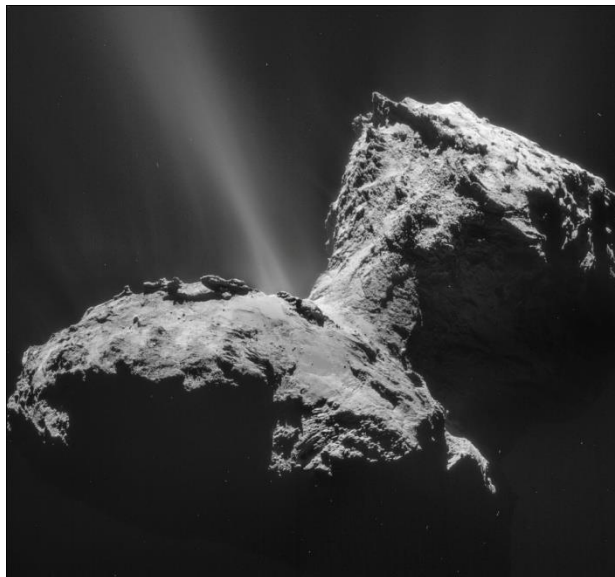
Giant planets (light, gaseous, H, He, density $0.7-2 \text{ g/cm}^3$)



- Júpiter se formó en menos de 10 millones de años...

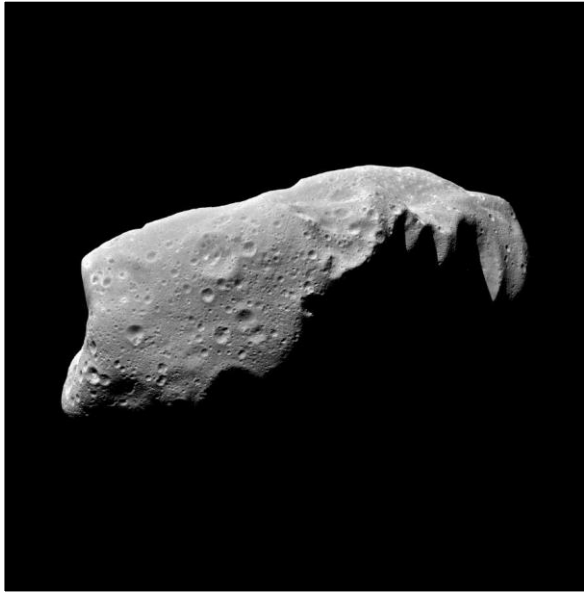
- Mientras la Tierra lo hizo en unos 100 millones de años.

- Cometas y Asteroides: *residuos de la formación planetaria.*



Cuerpos menores del Sistema Solar

Asteroides



Rocosos/Metálicos

Cometas



Volátiles congelados y polvo

Remanentes de la acreción planetaria.

El Cinturón de Asteroides y los Asteroides Cercanos a la Tierra

Green

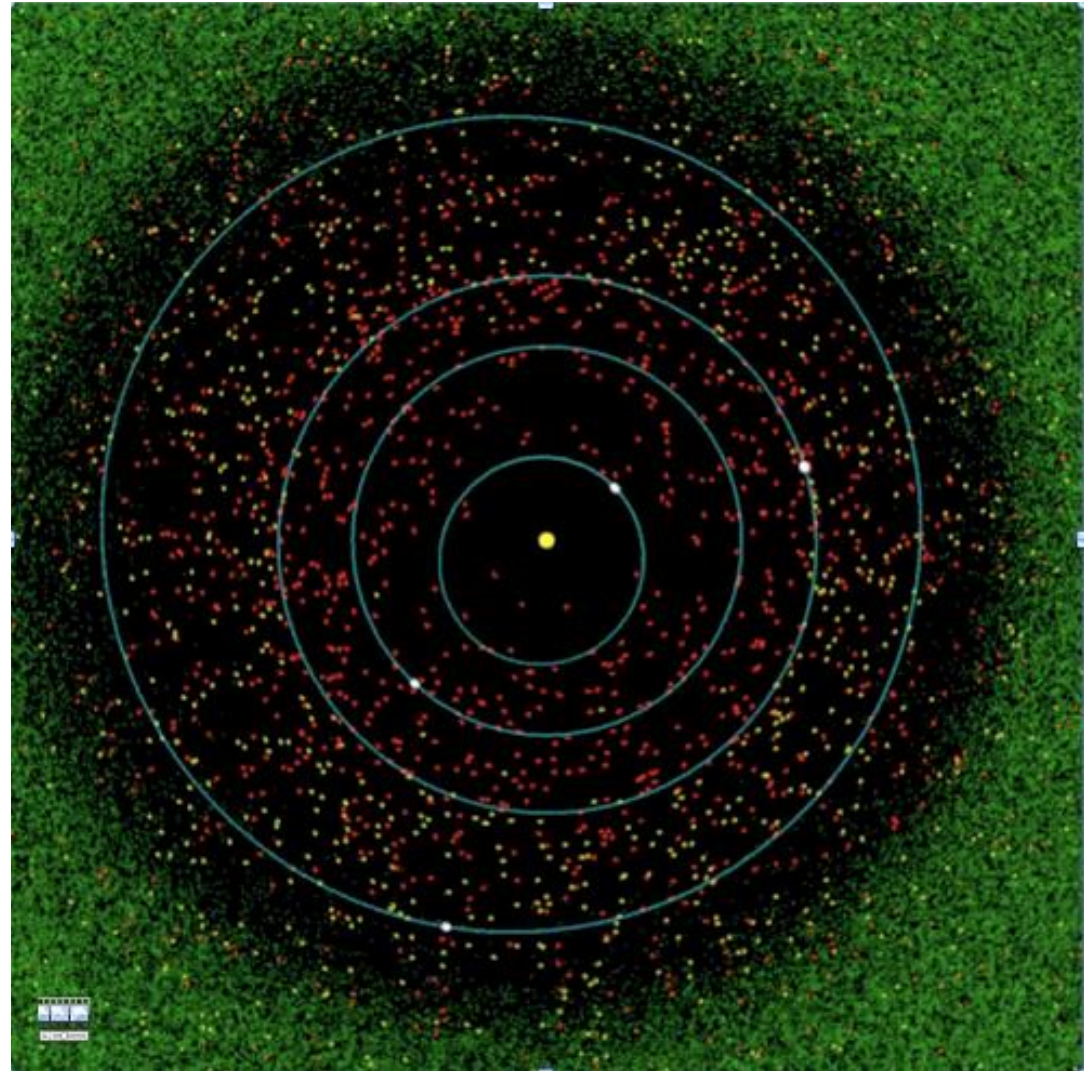
the main-belt
of asteroids

Yellow

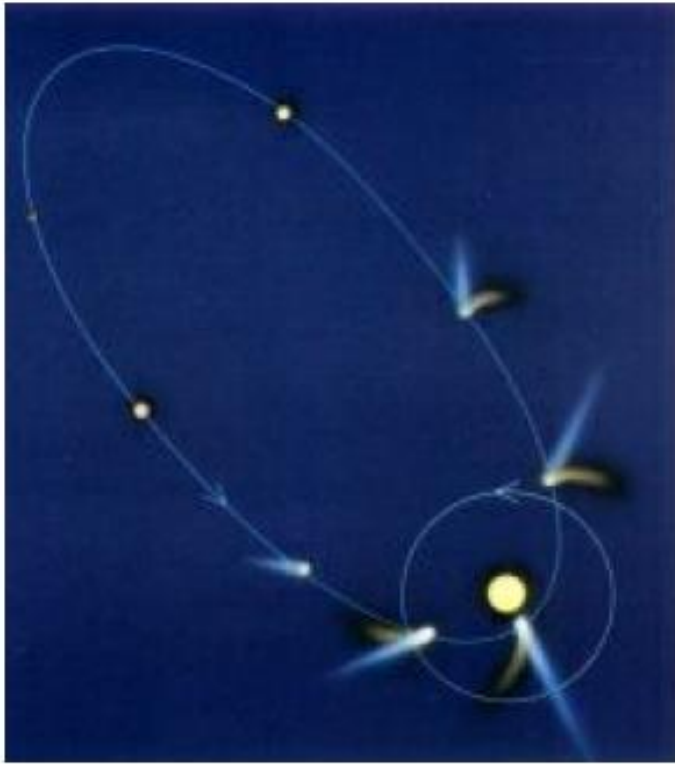
asteroids
which come
close to Earth
but don't cross
our orbit

Red

asteroids
which cross
the orbit of the
Earth



Cuerpos pequeños del sistema solar: cometas



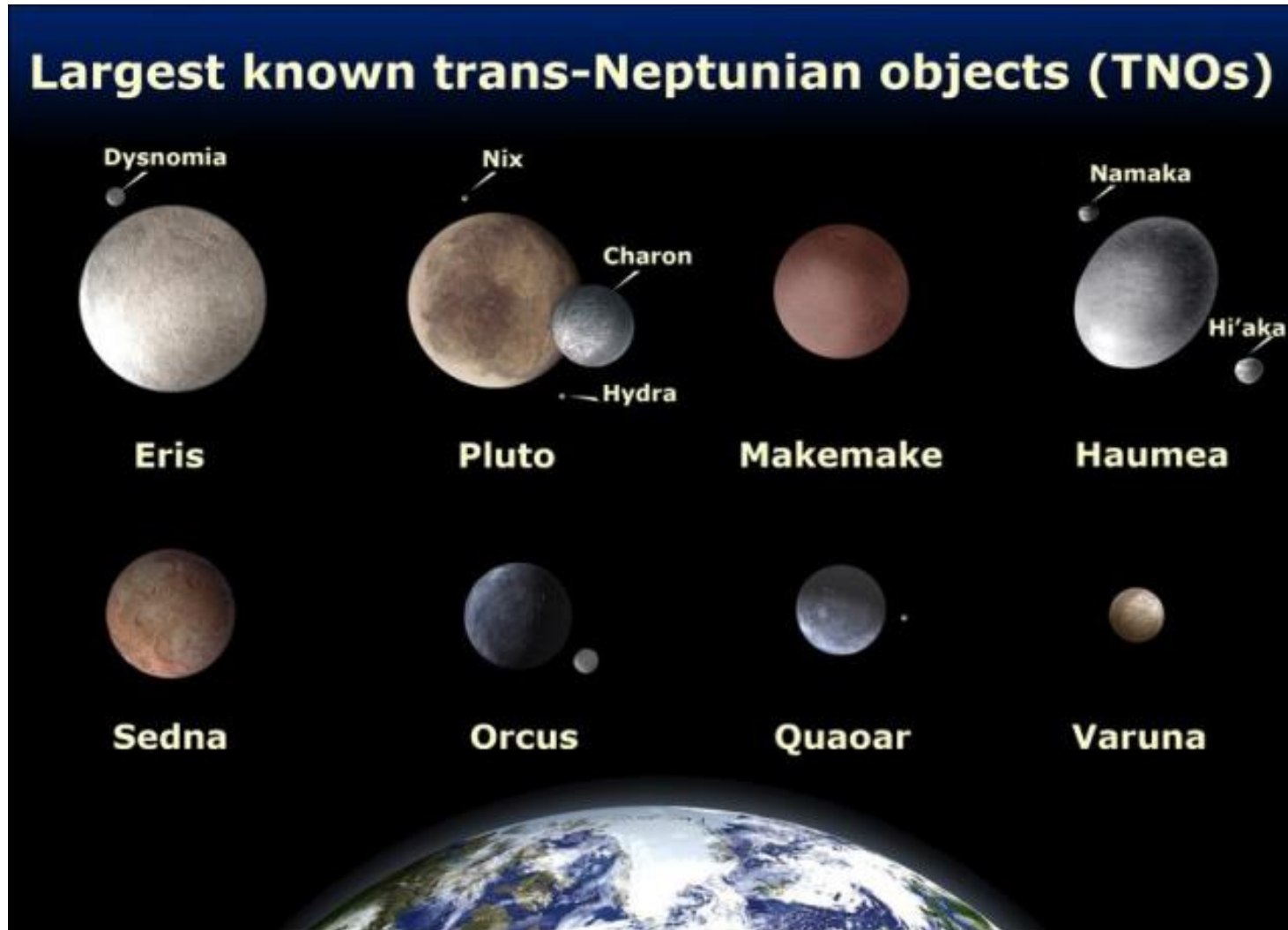
Órbita de un cometa



Cometa Hale-Bopp

* Los cometas son objetos ricos en agua y otros volátiles que se mueven en órbitas muy excéntricas (una parte en órbitas cuasi-parabólicas). Al acercarse al Sol los volátiles congelados se subliman formando la coma y las colas.

Objetos Trans-neptunianos (TNOs)



La primera gran crisis en la definición de planeta - Definición de asteroide



Comparación del tamaño de Ceres con los de la Tierra y la Luna



Ceres y Vesta
(Telescopio Espacial Hubble)

Jerarquización de los objetos planetarios: desde pedazos de roca hasta objetos redondos



Cuando un objeto adquiere la suficiente masa la gravedad del material vence la resistencia interna del mismo y lo moldea en una forma esférica debido a que la fuerza de gravedad es una fuerza central.

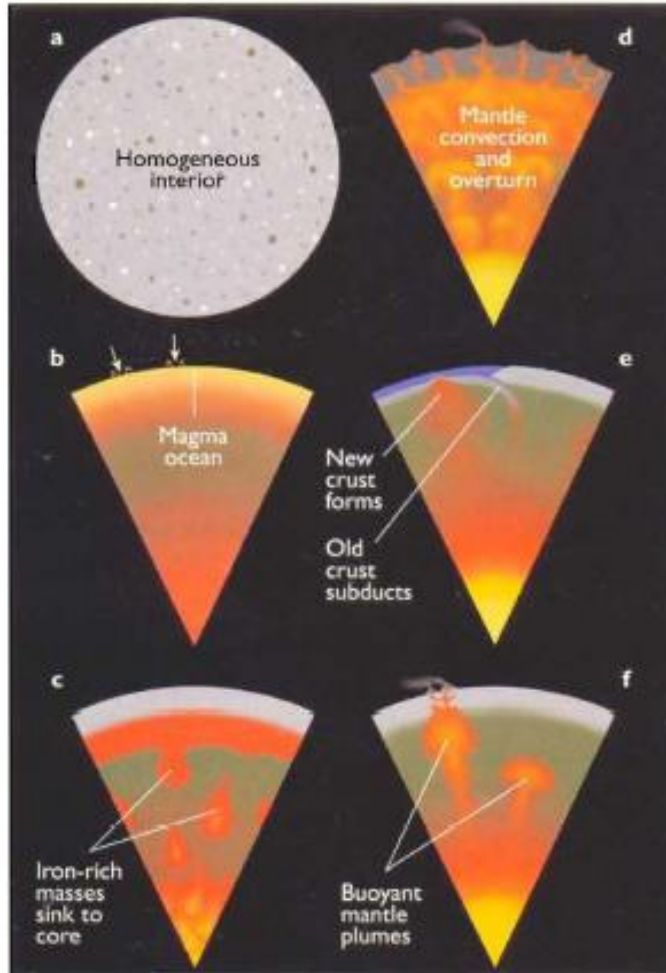
Nueva definición de planeta

* En 2006 la Asamblea General de la Unión Astronómica Internacional, reunida en Praga, redefinió un planeta como:

1. Un “planeta” es un cuerpo celeste que (a) está en órbita alrededor del Sol, (b) tiene suficiente masa como para que su auto-gravedad se imponga a las fuerzas del cuerpo rígido de modo que asume una forma en equilibrio hidrostático (cuasi esférica), y (c) ha limpiado su vecindad a lo largo de la órbita de otros objetos.
2. Un “planeta enano” es un cuerpo celeste que (a) está en órbita alrededor del Sol, (b) tiene suficiente masa como para que su auto-gravedad se imponga a las fuerzas del cuerpo rígido de modo que asume una forma en equilibrio hidrostático (cuasi esférica), y (c) no ha limpiado su vecindad a lo largo de la órbita de otros objetos, y (d) no es un satélite.
3. Todos los otros objetos, excepto satélites, que orbitan el Sol serán referidos colectivamente como “Cuerpos Pequeños del Sistema Solar”.

De acuerdo a esta definición, Plutón (así como Ceres, Eris, Makemake y Haumea) pasan a la categoría de “planetas enanos”.

Proceso de diferenciación interior de un planeta

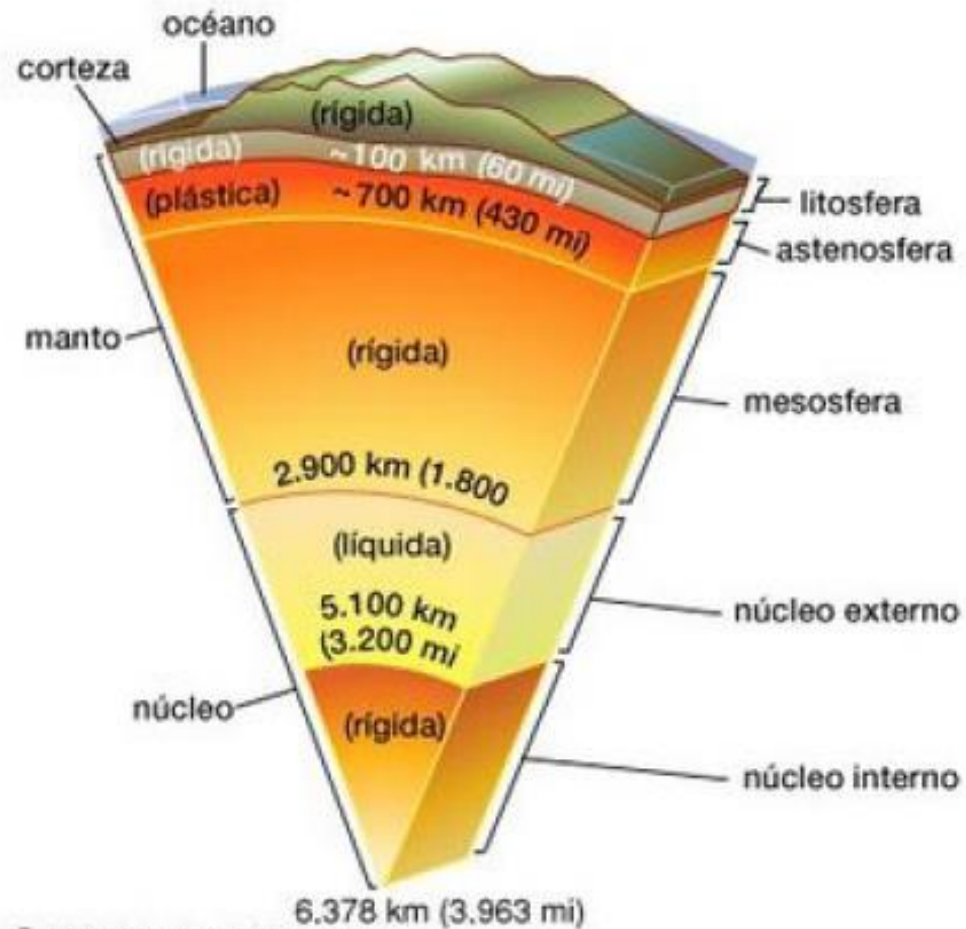


- a) Interior inicial homogéneo.
- b) La energía cinética impartida por los impactos derrite el material y provoca la segregación del más denso hacia el núcleo. La corteza es el material más liviano que, como una escoria, queda flotando sobre el manto.
- c) El decaimiento de isótopos radioactivos mantiene el manto parcialmente derretido (magma): el más liviano asciende hacia la superficie provocando derrames de lava y volcanes.

Componentes principales de algunas atmósferas

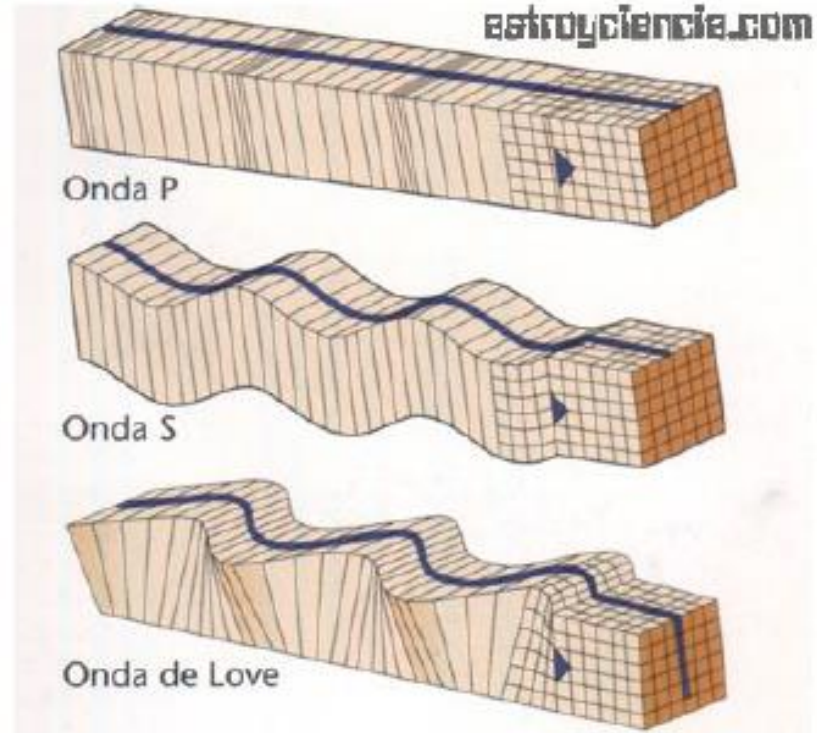
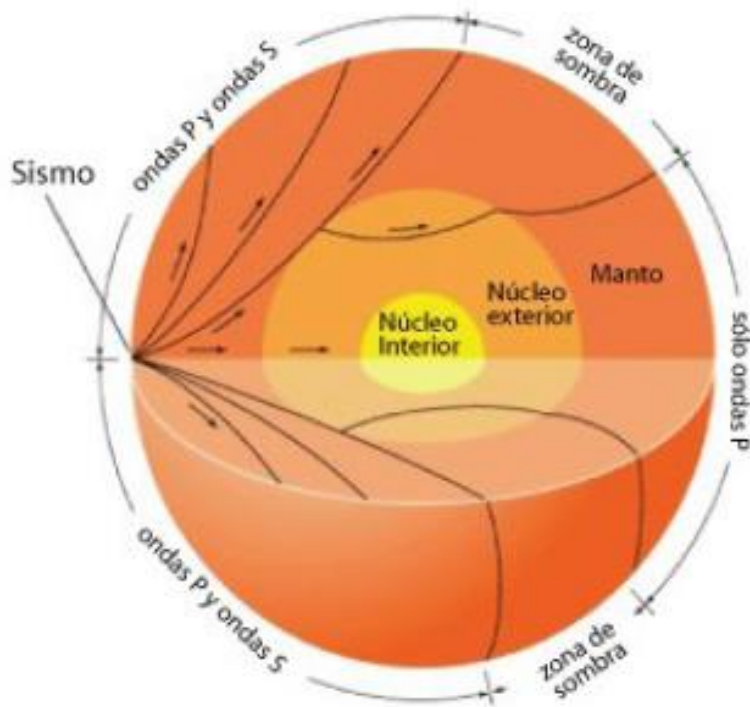
Atmospheric Compositions Compared			
<i>Planet</i>	<i>Molecule</i>	<i>Abundance (bars)</i>	<i>Fraction of total</i>
Venus	CO ₂	86.4	0.96
	N ₂	3.2	0.035
	Ar	0.0063	0.000070
	H ₂ O	0.009	0.000100
Earth	N ₂	0.78	0.77
	O ₂	0.21	0.21
	H ₂ O	0.01	0.01
	Ar	0.94	0.0093
	CO ₂	0.000355	0.00035
Mars	CO ₂	0.0062	0.95
	N ₂	0.00018	0.027
	Ar	0.00010	0.016
	H ₂ O	3.9×10^{-7}	0.00006

El interior de la Tierra



© 2006 Merriam-Webster, Inc.

Propagación de ondas sísmicas



* La propagación de las ondas sísmicas permite conocer el interior de la Tierra (propiedades del material, si es líquido o sólido)

Formación de la Luna



·Habría ocurrido por un megaimpacto de un protoplaneta de tamaño similar a Marte.

·El impacto habría desprendido material de la corteza terrestre cuyos fragmentos se distribuyeron en torno a la Tierra, y luego se reagruparon dando origen a la Luna.

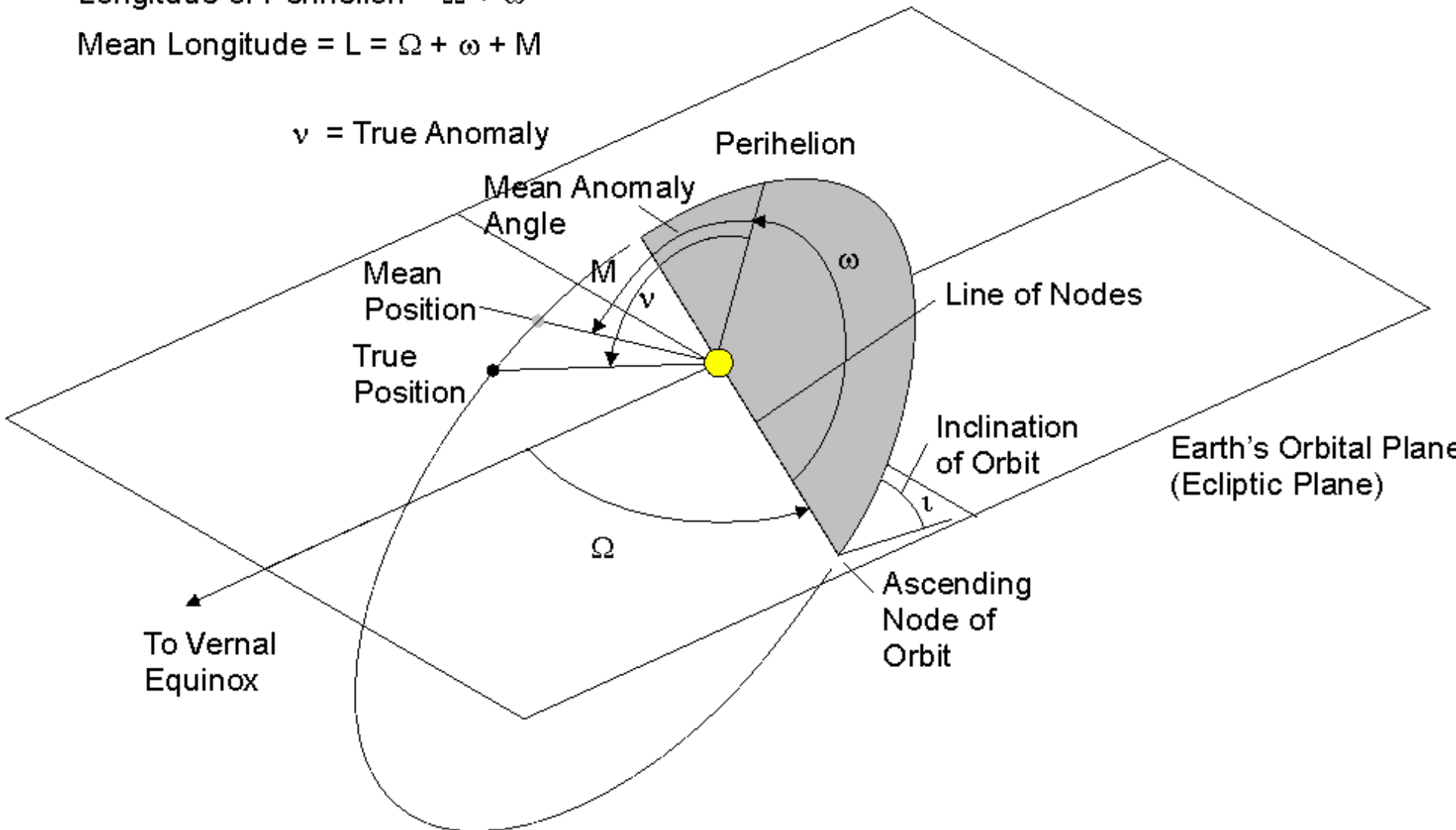
Asteroides

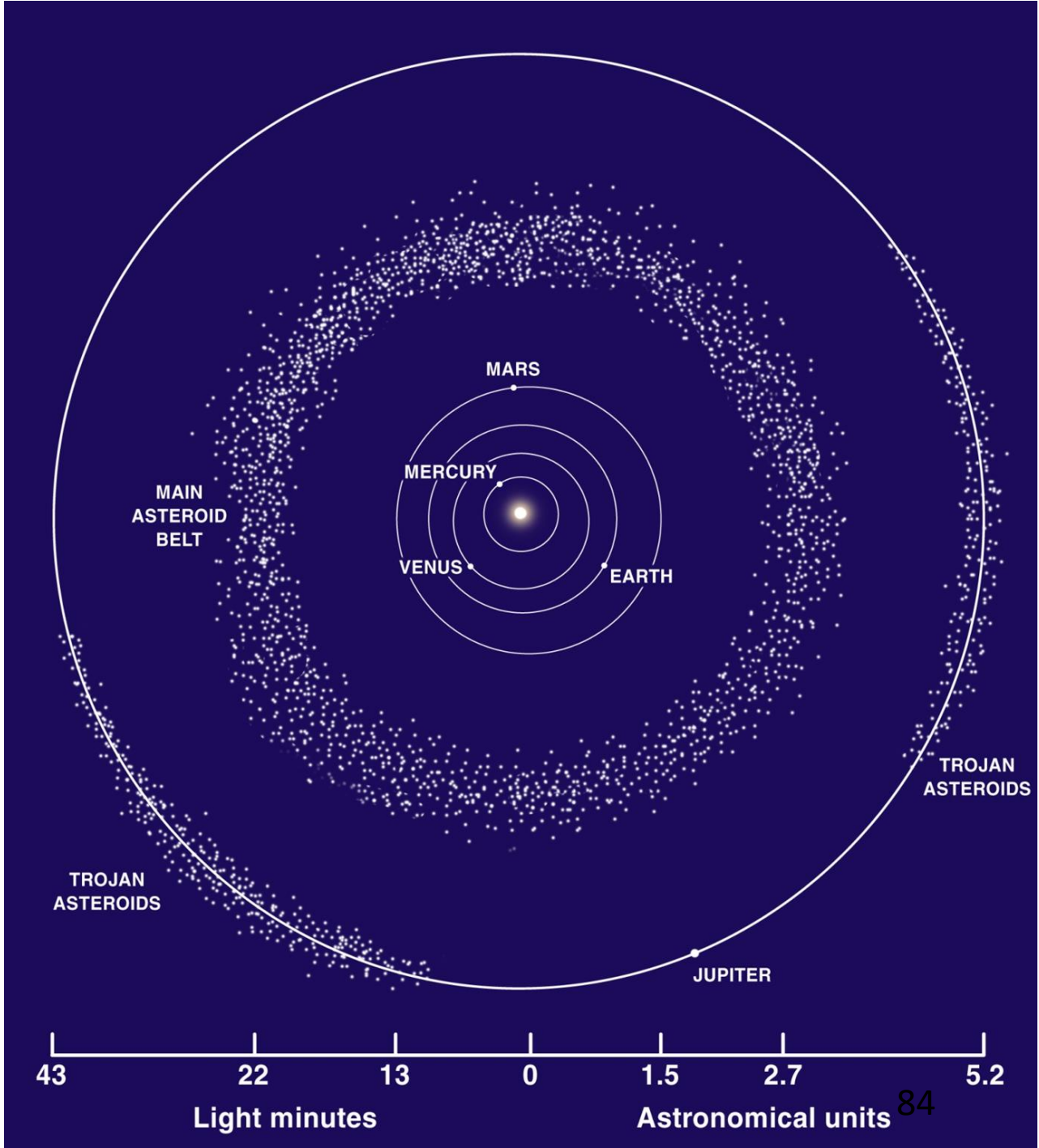
- .Ubicación
- .Características generales
- .Distribución de elementos orbitales
- .Fotometría y curvas de luz
- .Clasificación taxonómica

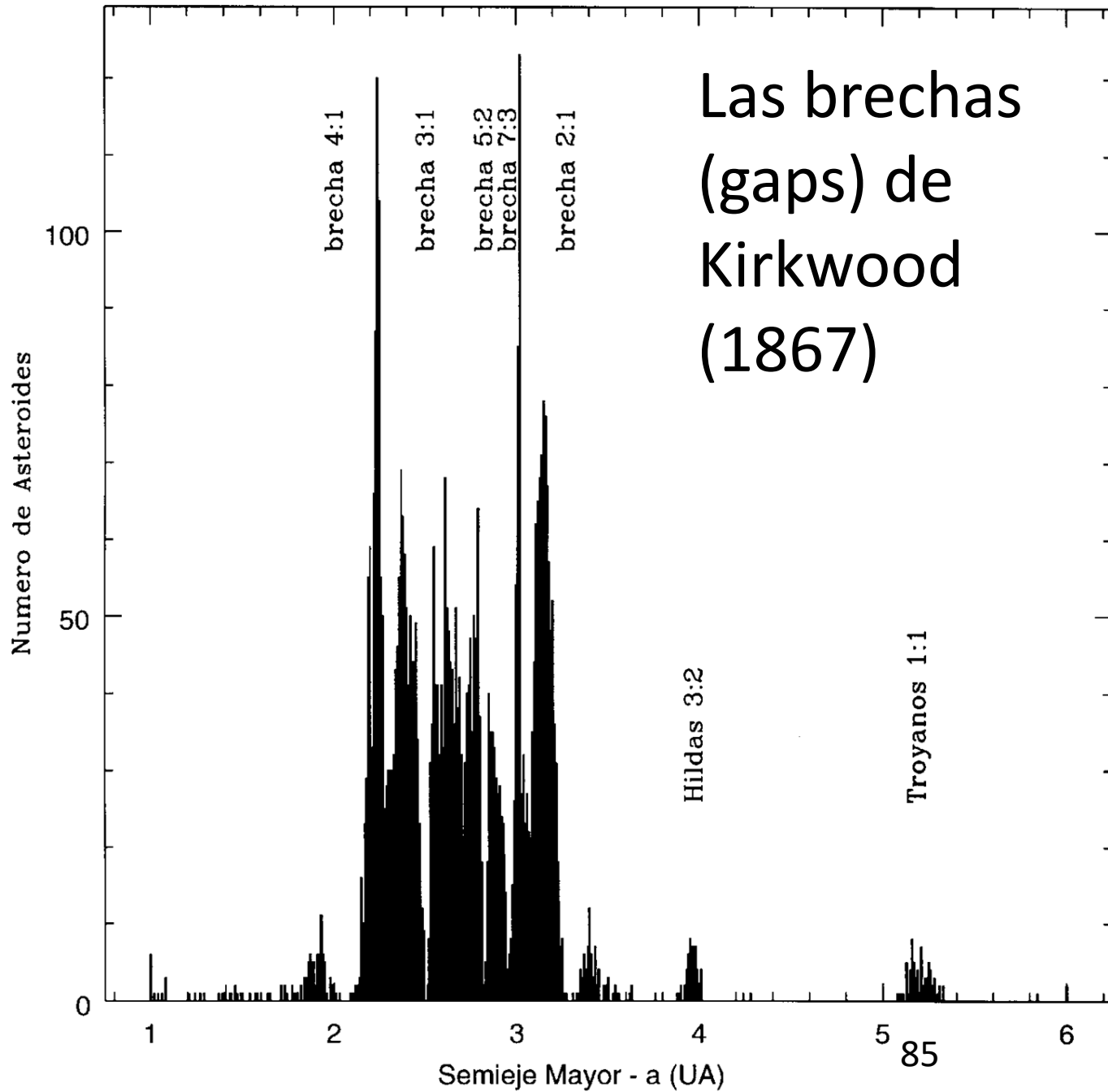
Elementos orbitales

Longitude of Perihelion = $\Omega + \omega$

Mean Longitude = $L = \Omega + \omega + M$



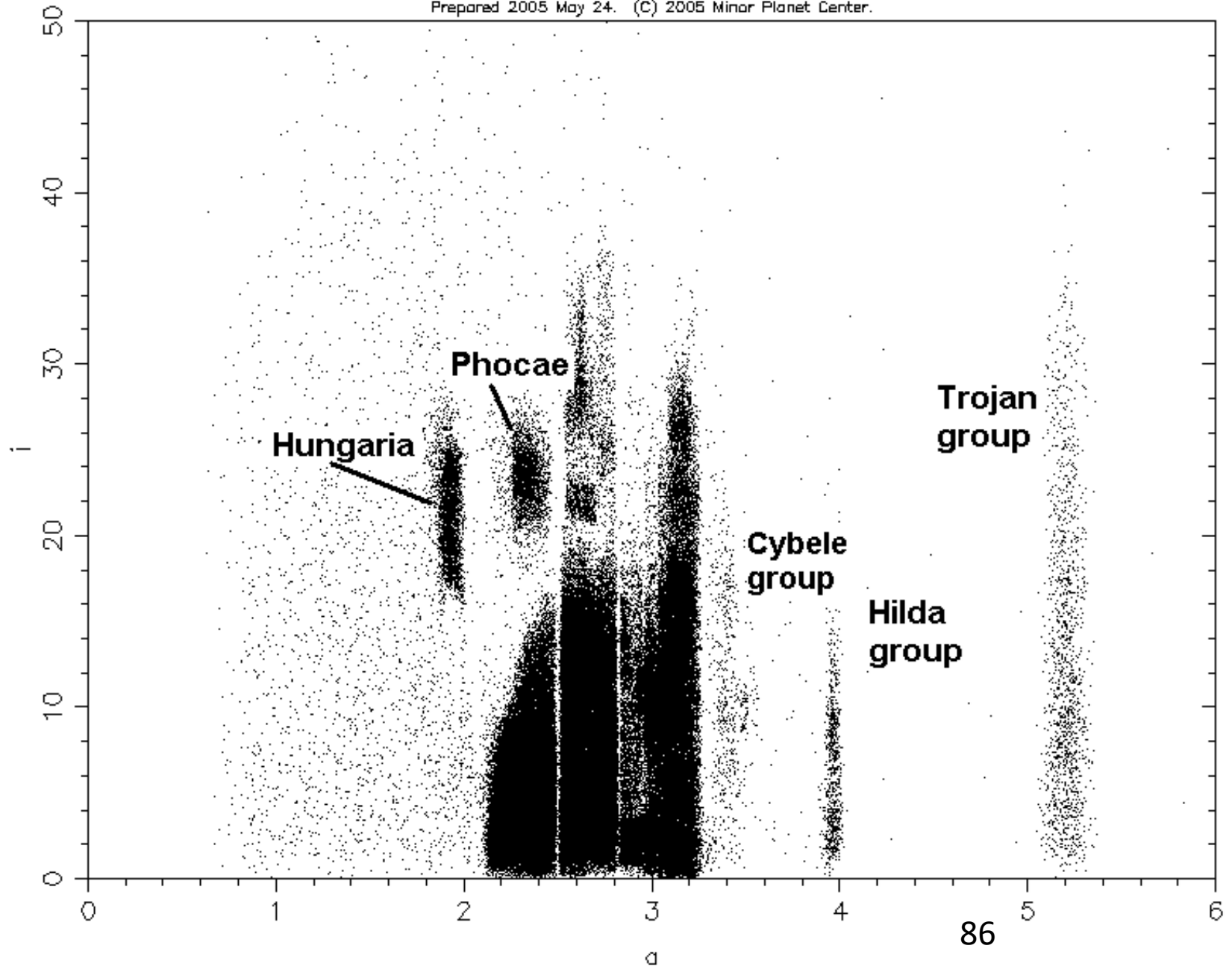




Distribution of the Minor Planets: a vs i

a vs i

Prepared 2005 May 24. (C) 2005 Minor Planet Center.



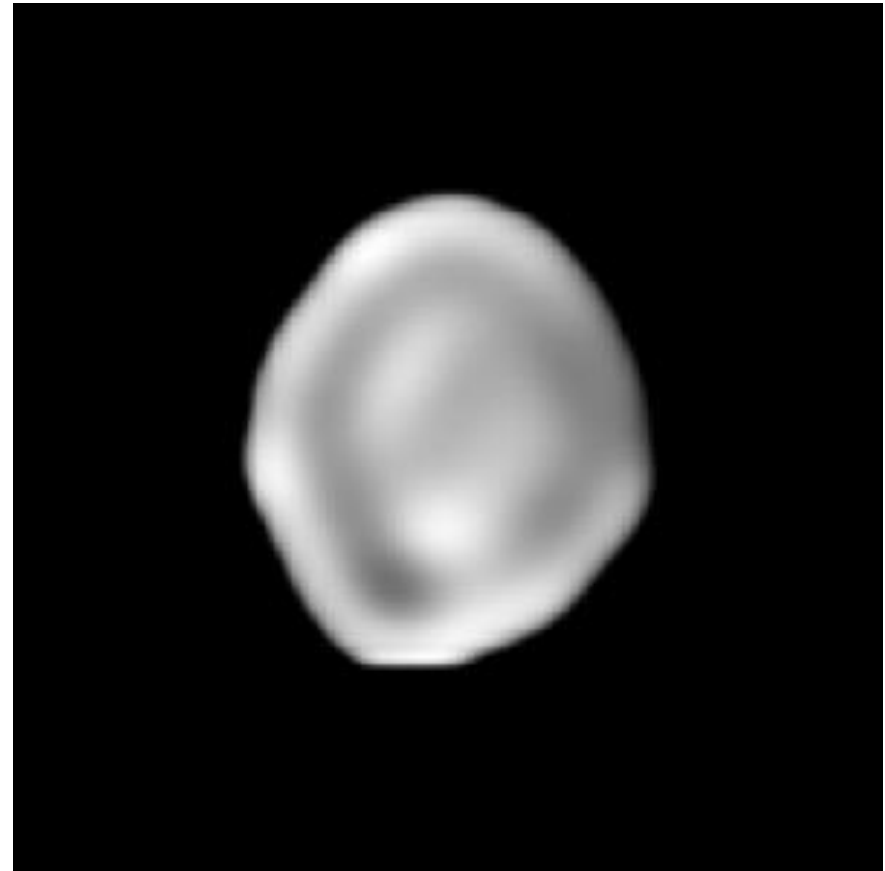
Propiedades físicas

- .Tamaños

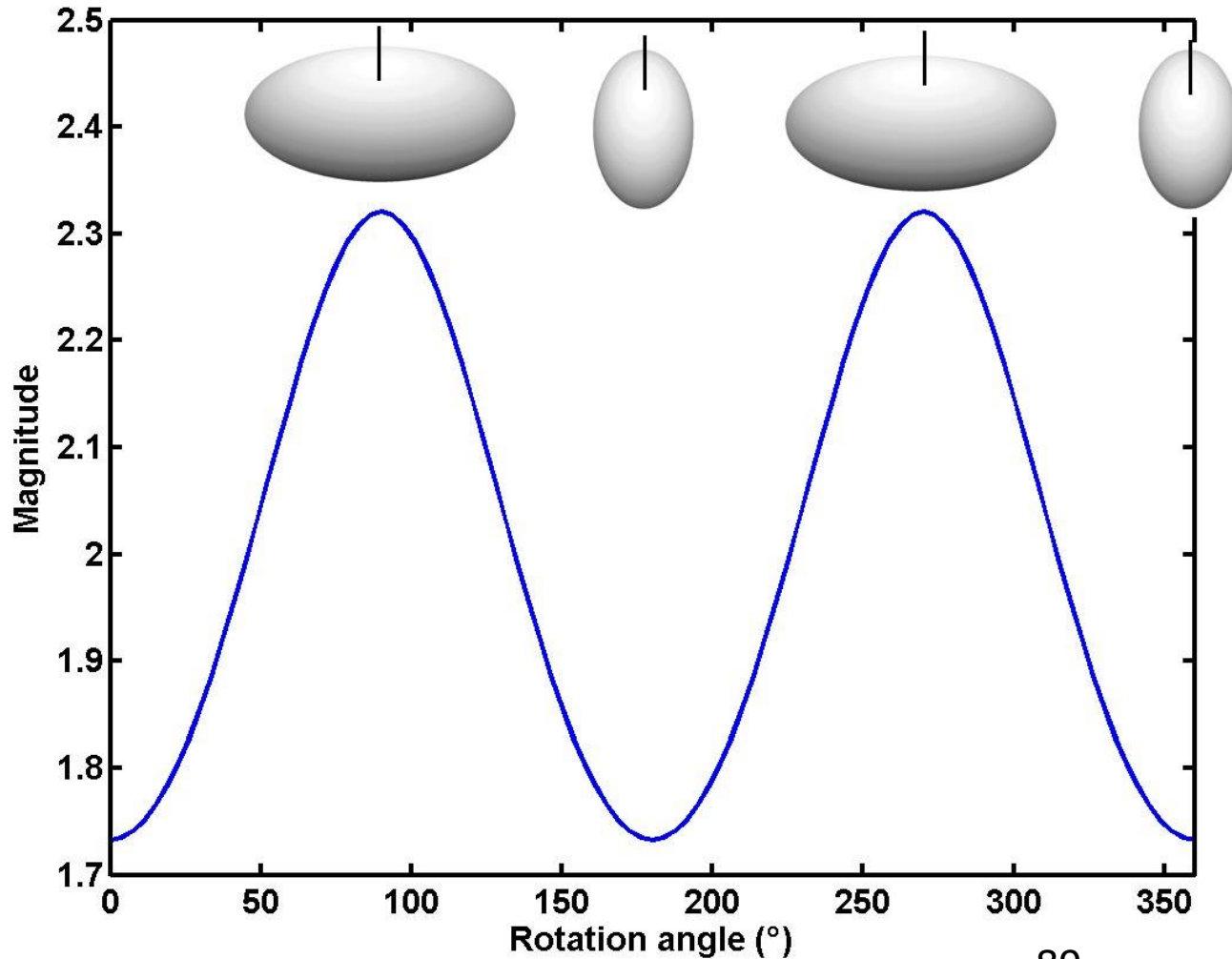
- .Rotación

- .Características superficiales (clasificación taxonómica)

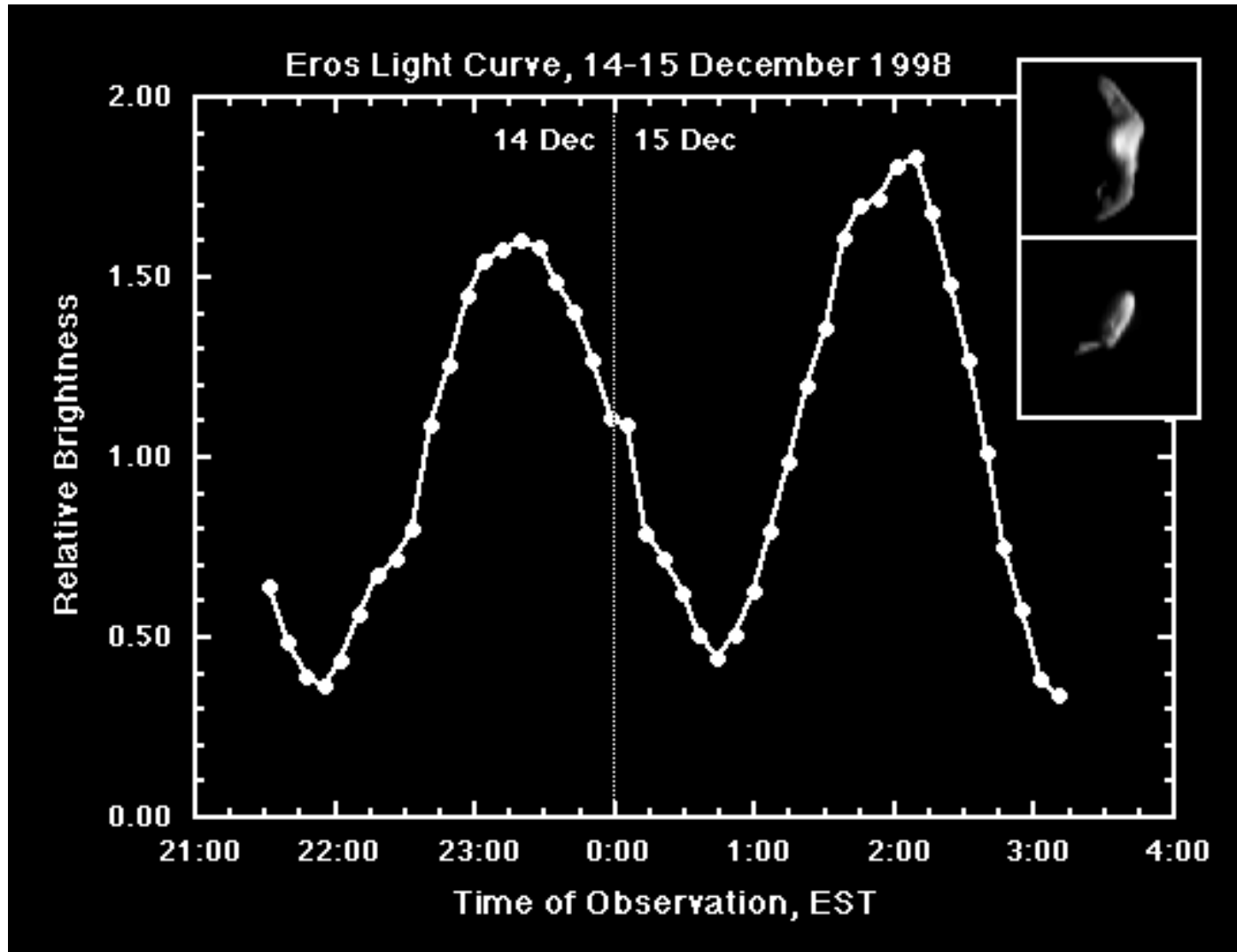
Rotación



La curva de luz de un elipsoide triaxial



Curvas de luz



Taxonomía de asteroides

Tipo	Albedo	Espectro	Mineralogía
C	☐ 0.065	Plano, débiles rasgos	Silicatos mas minerales ricos en carbón
S	0.065 – 0.23	Rojizo, absorciones del Fe ²⁺	Silicatos + metal
M	0.065 – 0.23	Ligeramente rojizo	Metal o metal + silicatos neutros
E	> 0.3	Chato, sin rasgos	Silicatos neutros
D	☐ 0.065	Rojo, sin rasgos	Materiales orgánicos

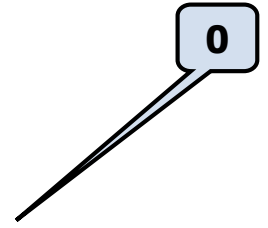
Definiciones

·**Meteoroides:** Cualquier objeto de pequeño tamaño que se mueve en el espacio (fragmentos de asteroides o cometas)

·**Meteoro:** Meteoroides que ingresan a la atmósfera y debido al rozamiento con el gas atmosférico producen trazas luminosas.

·**Meteorito:** Fragmentos de meteoros que no se desintegran totalmente y que llegan a la superficie de la Tierra

Meteorites



Distinguish between:

Meteoroid = small body in space

Meteor = meteoroid colliding with Earth and producing a visible light trace in the sky

Meteorite = meteor that survives the plunge through the atmosphere to strike the ground...

- Sizes from microscopic dust to a few centimeters.
- About 2 meteorites large enough to produce visible impacts strike the Earth every day.
- Statistically, one meteorite is expected to strike a building somewhere on Earth every 16 months.
- Typically impact onto the atmosphere with 10 – 30 km/s (\approx 30 times faster than a rifle bullet).

Altura (km)

100 ▷

micro-
meteoritos

meteoros

80 ▷

60 ▷

bólidos

40 ▷

grandes
bólidos

20 ▷

nubes altas

meteoritos

masa inicial →

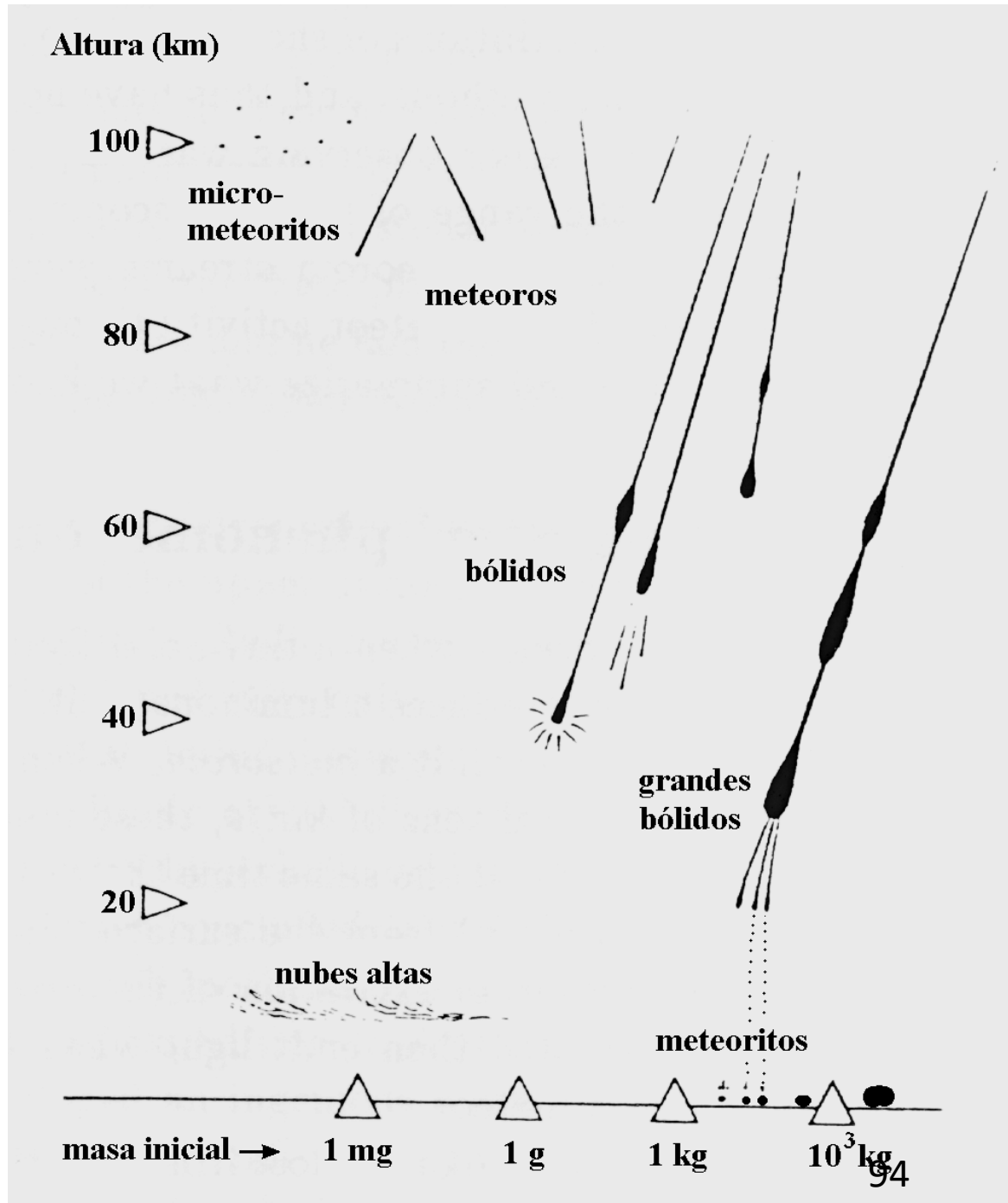
1 mg

1 g

1 kg

10^3 kg

94



Meteor Showers

0

Most meteors appear in showers, peaking periodically at specific dates of the year.

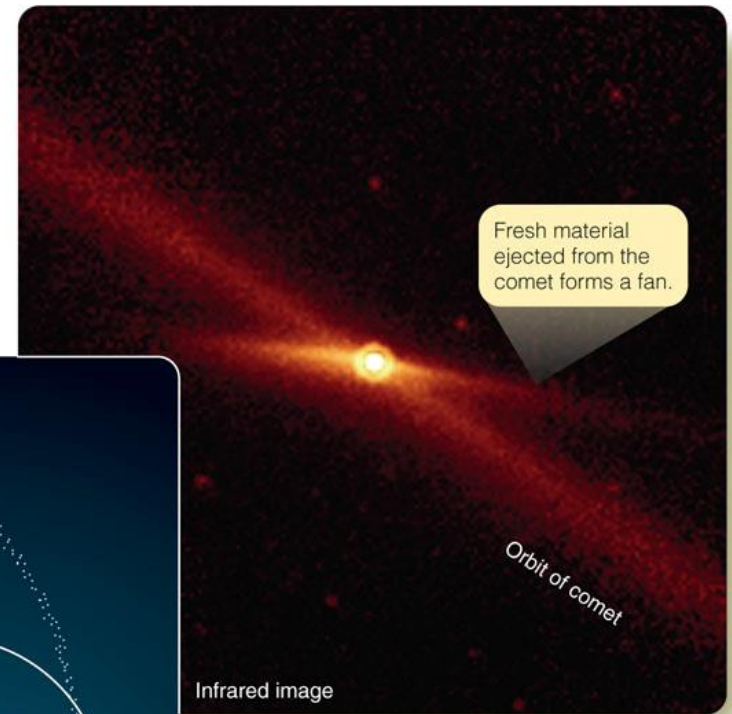
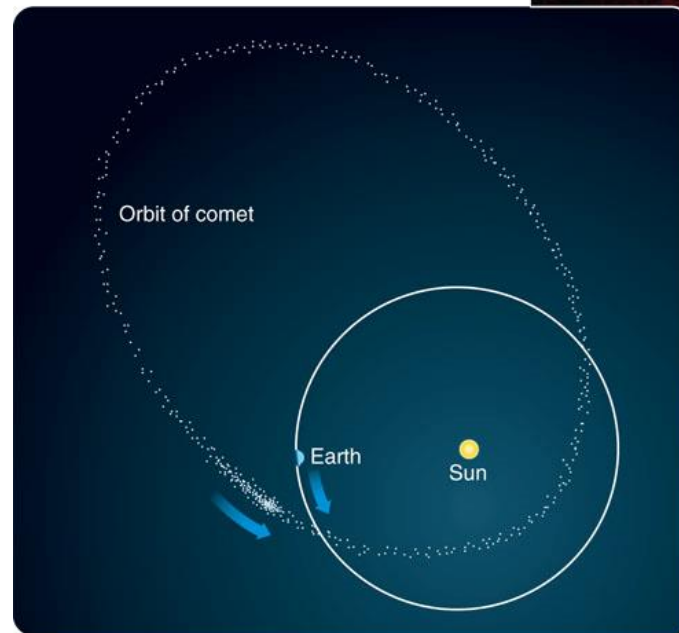
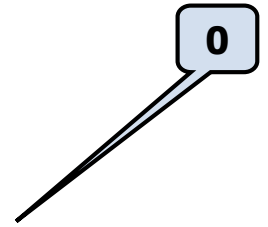
■ Table 25-1 | Meteor Showers

Shower	Dates	Hourly Rate	Radiant*		Associated Comet
			R. A.	Dec.	
Quadrantids	Jan. 2–4	30	15 ^h 24 ^m	50°	
Lyrids	April 20–22	8	18 ^h 4 ^m	33°	1861 I
η Aquarids	May 2–7	10	22 ^h 24 ^m	0°	Halley?
δ Aquarids	July 26–31	15	22 ^h 36 ^m	–10°	
Perseids	Aug. 10–14	40	3 ^h 4 ^m	58°	1982 III
Orionids	Oct. 18–23	15	6 ^h 20 ^m	15°	Halley?
Taurids	Nov. 1–7	8	3 ^h 40 ^m	17°	Encke
Leonids	Nov. 14–19	6	10 ^h 12 ^m	22°	1866 I Temp
Geminids	Dec. 10–13	50	7 ^h 28 ^m	32°	

*R. A. and Dec. give the celestial coordinates (right ascension and declination) of the radiant of each shower.

Meteoroid Orbits

- Meteoroids contributing to a meteor shower are debris particles, orbiting in the path of a comet.
- Spread out all along the orbit of the comet.
- Comet may still exist or have been destroyed.



Only a few *sporadic meteors* are not associated with comet orbits.

Las bolas de fuego o bólidos

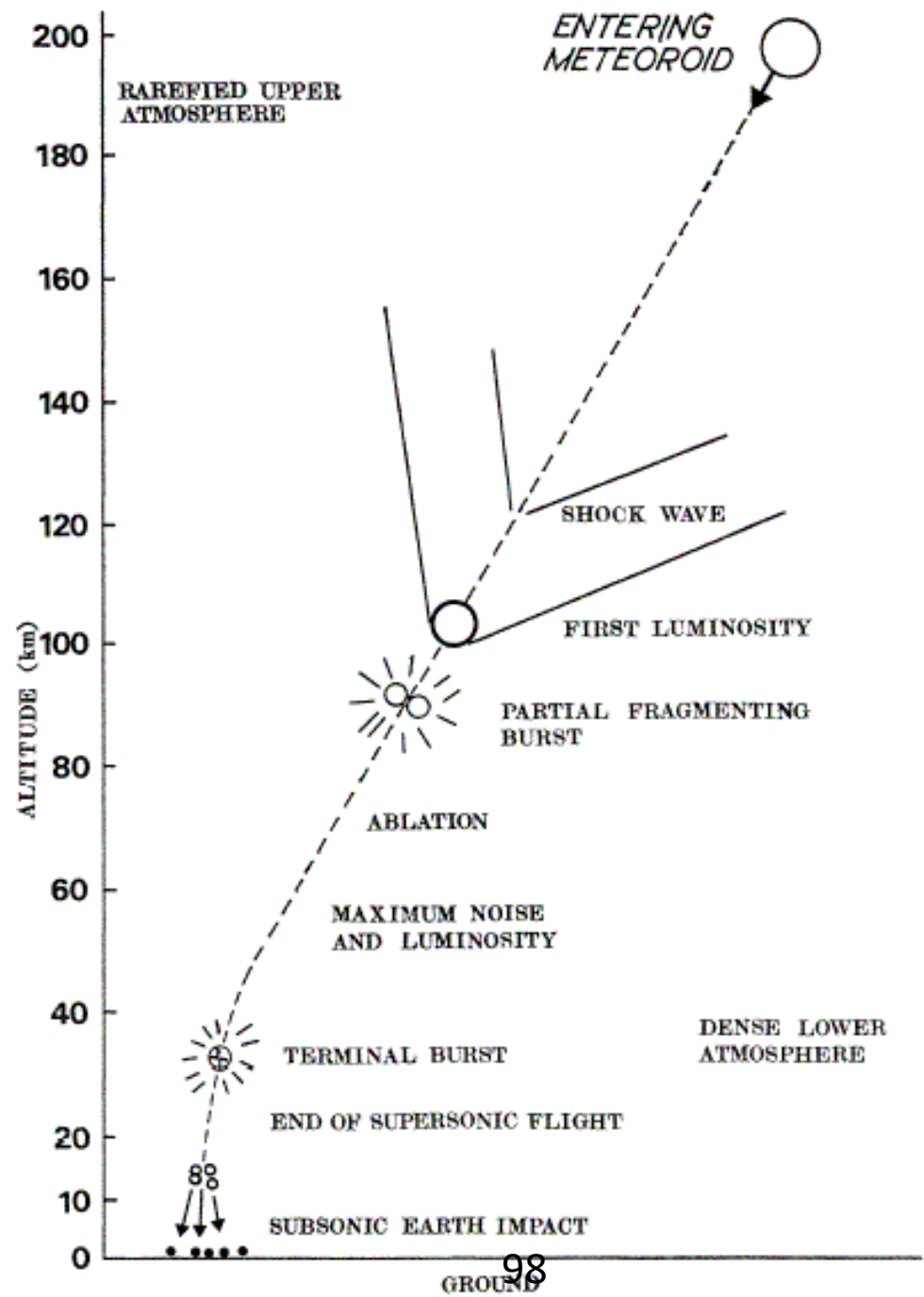
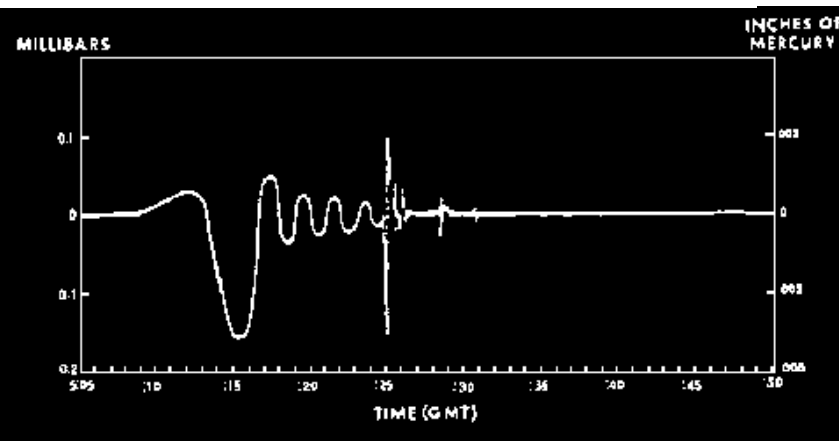


Los sonidos

Dos sonidos:

- Boom sónico: minutos después del bólido
- Ruido electrofónico: simultáneo con el bólido

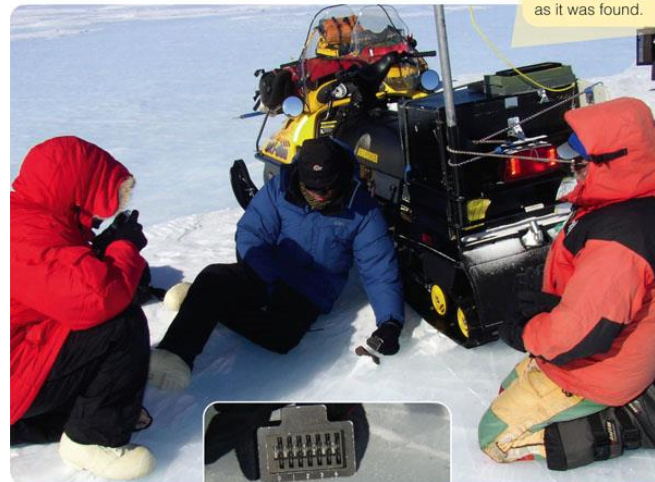
Variaciones de la presión barométrica cuando el fenómeno de Tunguska



Finding Meteorites

0

Most meteorites are small and do not produce significant craters.



Each meteorite is assigned a number and photographed as it was found.

Good place to find meteorites:
Antarctica!



Large or small, meteorites are sealed airtight and refrigerated until they can be studied.

© 2007 Thomson Higher Education

Distinguish between:

- Falls = meteorites which have been observed to fall (fall time known).
- Finds = meteorites with unknown fall time.

Analysis of Meteorites

0

3 broad categories:

- Iron meteorites

Iron meteorites are very heavy for their size and have a dark, irregular surface.



Stony meteorites tend to have a fusion crust caused by melting in Earth's atmosphere.

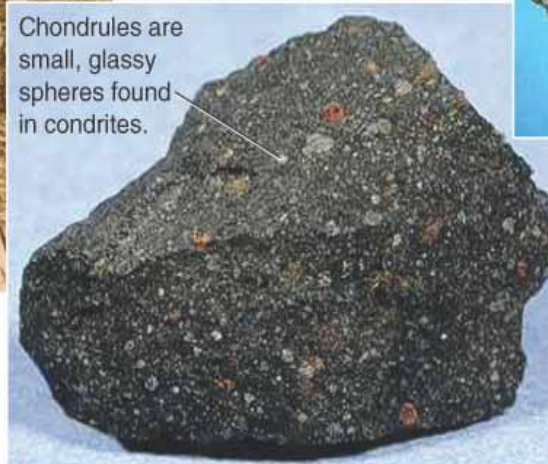
- Stony meteorites

A stony-iron meteorite cut and polished reveals a mixture of iron and rock.



Cut, polished, and etched with acid, iron meteorites show a Widmanstätten pattern.

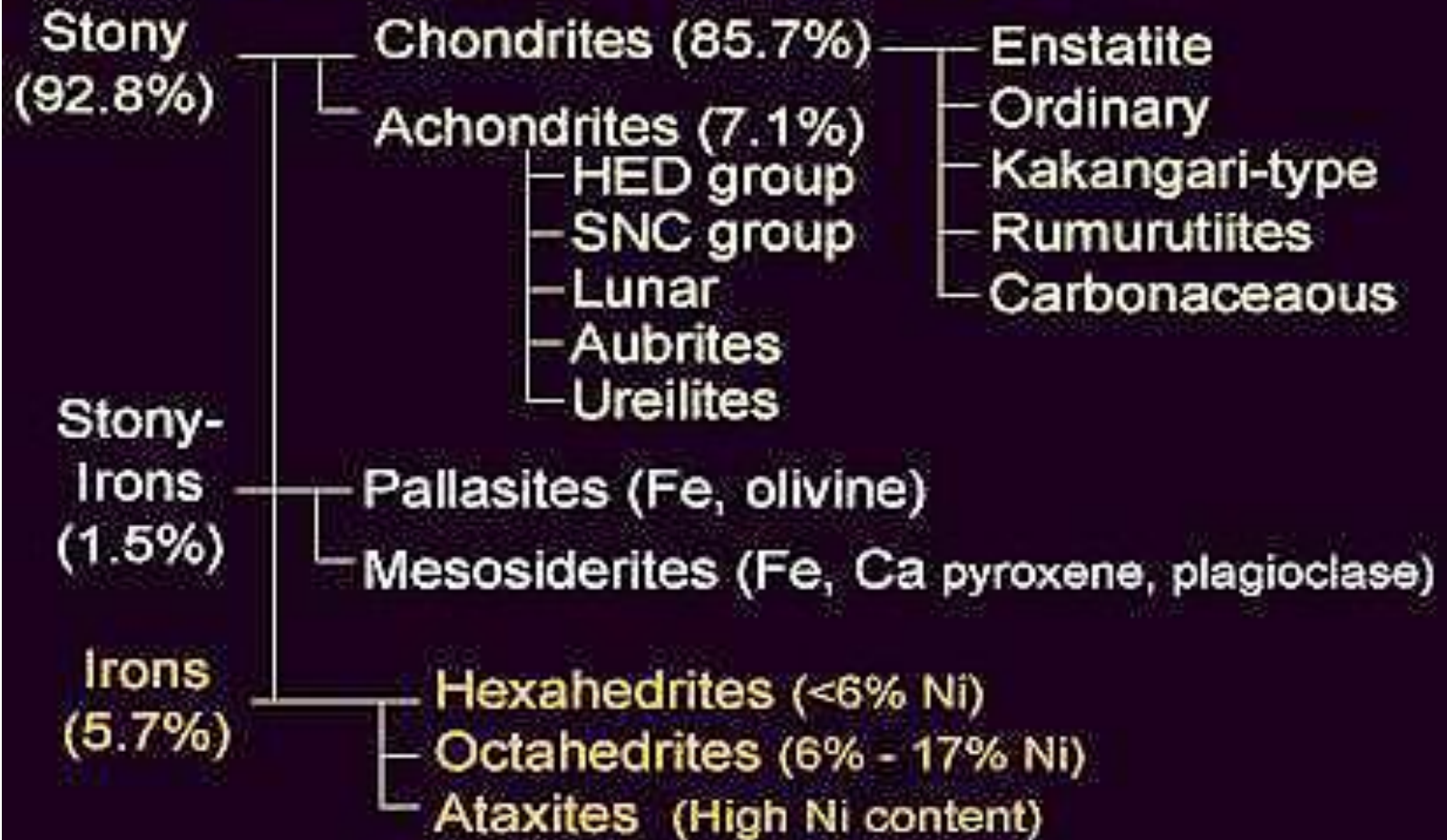
Chondrules are small, glassy spheres found in chondrites.



This carbonaceous chondrite contains chondrules and volatiles, including carbon, that make the rock very dark.

- Stony-Iron meteorites

Classification of Meteorites



Chondrites

Stony Meteorites are characterized by [chondrules](#)--small spheres (average diameter of 1 mm) of formerly melted minerals that have come together with other mineral matter to form a solid rock. Chondrites are believed to be among the oldest rocks in the solar system. Click [here](#) to link to an article on the Nature and Origin of Chondrules. Click [here](#) to see a close-up picture of chondrules. **82 percent of meteorite falls are chondrites.**



Achondrites

.Stony Meteorites without chondrules. Scientists believe that some of these meteorites originated on the surface of the Moon or Mars. **7.8 percent of meteorite falls are achondrites.**



Irons

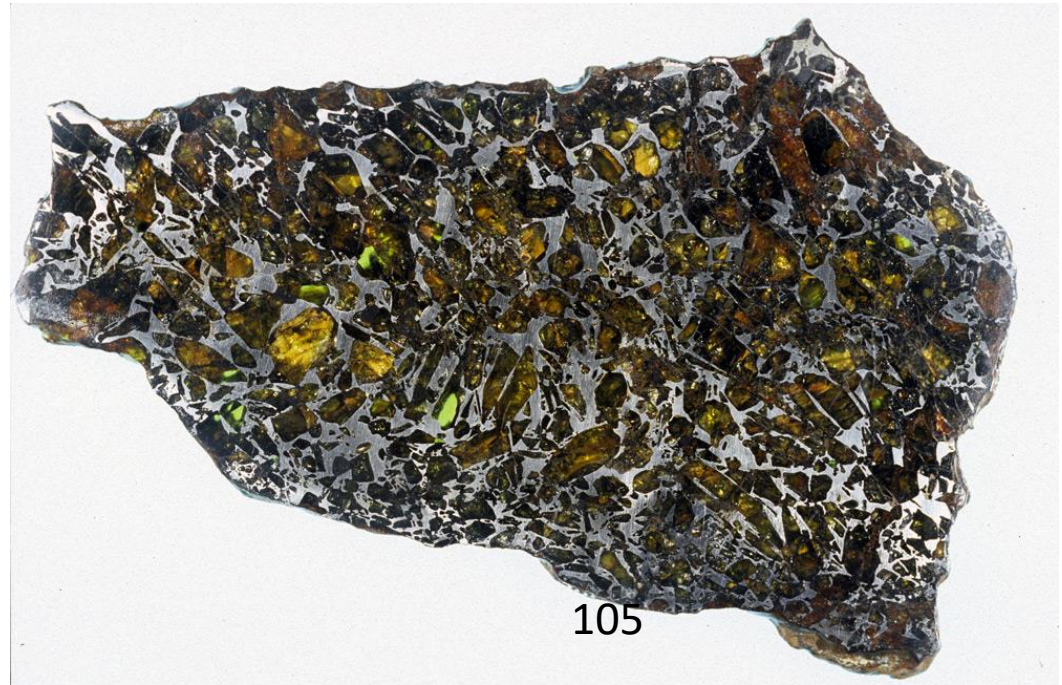
.Structural classification: These meteorites are made of a crystalline [iron-nickel alloy](#). Scientists believe that they resemble the outer core of the Earth. **4.8 percent of meteorite falls are irons.**

.Chemical Classification: The determining factors are groupings of meteorites with similar ratios of trace elements to nickel. Generally, the higher the Roman numeral of the classification, the lower the concentration of trace elements. The casual observer cannot see this as one can with the Widmanstätten bandwidth that is the determining factor for structural classification.

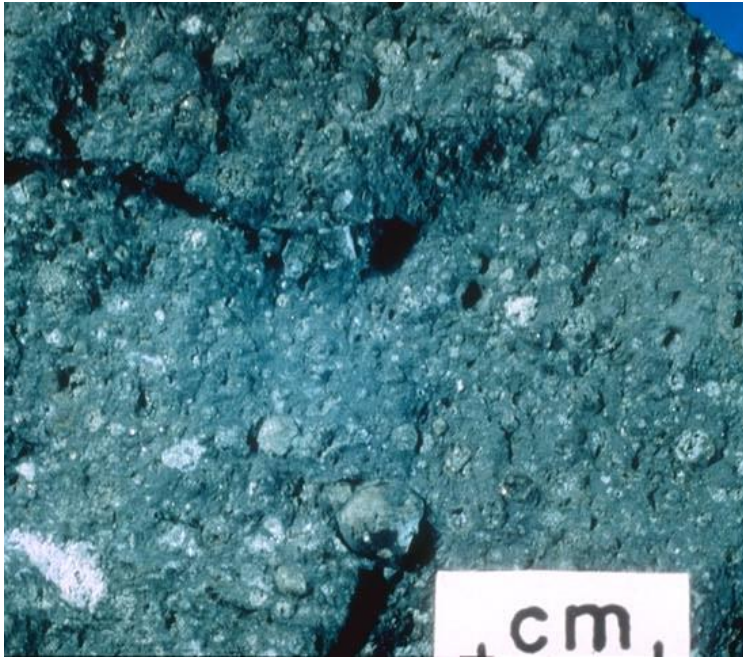


Stony Irons

.These meteorites are mixtures of [iron-nickel alloy](#) and non-metallic mineral matter. Scientists believe that they are like the material that would be found where the Earth's core meets the mantle. **1.2 percent of meteorite falls are stony irons.**

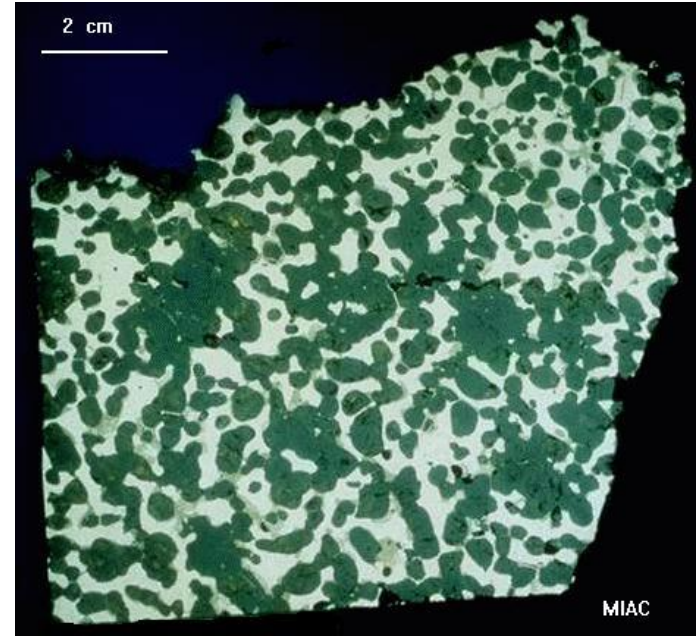


Detalle de cada tipo

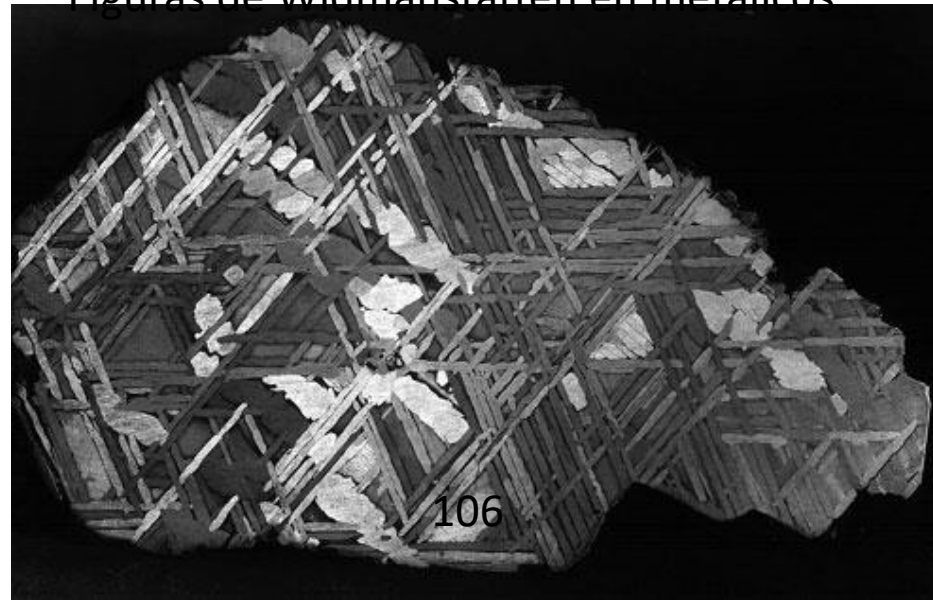
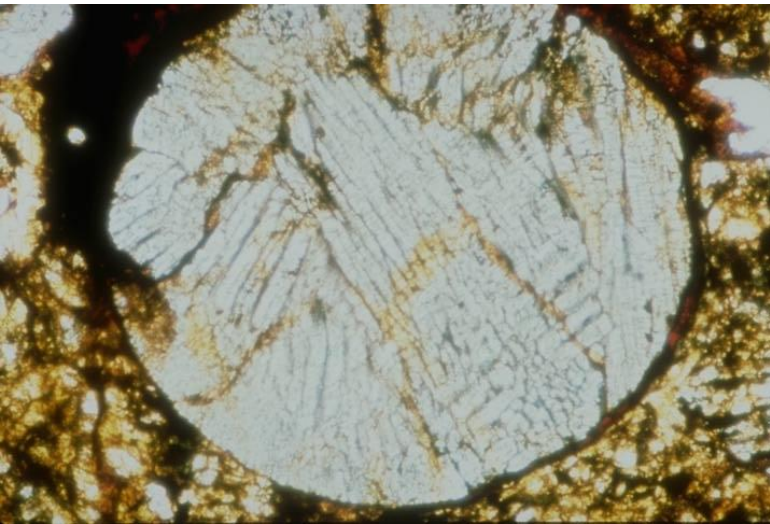


Cóndrulos en las condritas

Metorito
metálico-
rocoso



Figuras de Widmanstätten en metálicos



Los grandes meteoritos de Campo del Cielo (Chaco argentino)



37 Toneladas

What Does a “Meteorite” Look Like?

■ **Table 25-2** | **Proportions of Meteorites**

Type	Falls (%)	Finds (%)
Stony	92	26
Iron	6	66
Stony-iron	2	8

© 2007 Thomson Higher Education

Selection bias:

Iron meteorites are easy to recognize as meteorites (heavy, dense lumps of iron-nickel steel) – thus, more likely to be found and collected.

The Allende Meteorite

0



- . Carbonaceous chondrite, fell in 1969 near Pueblito de Allende, Mexico

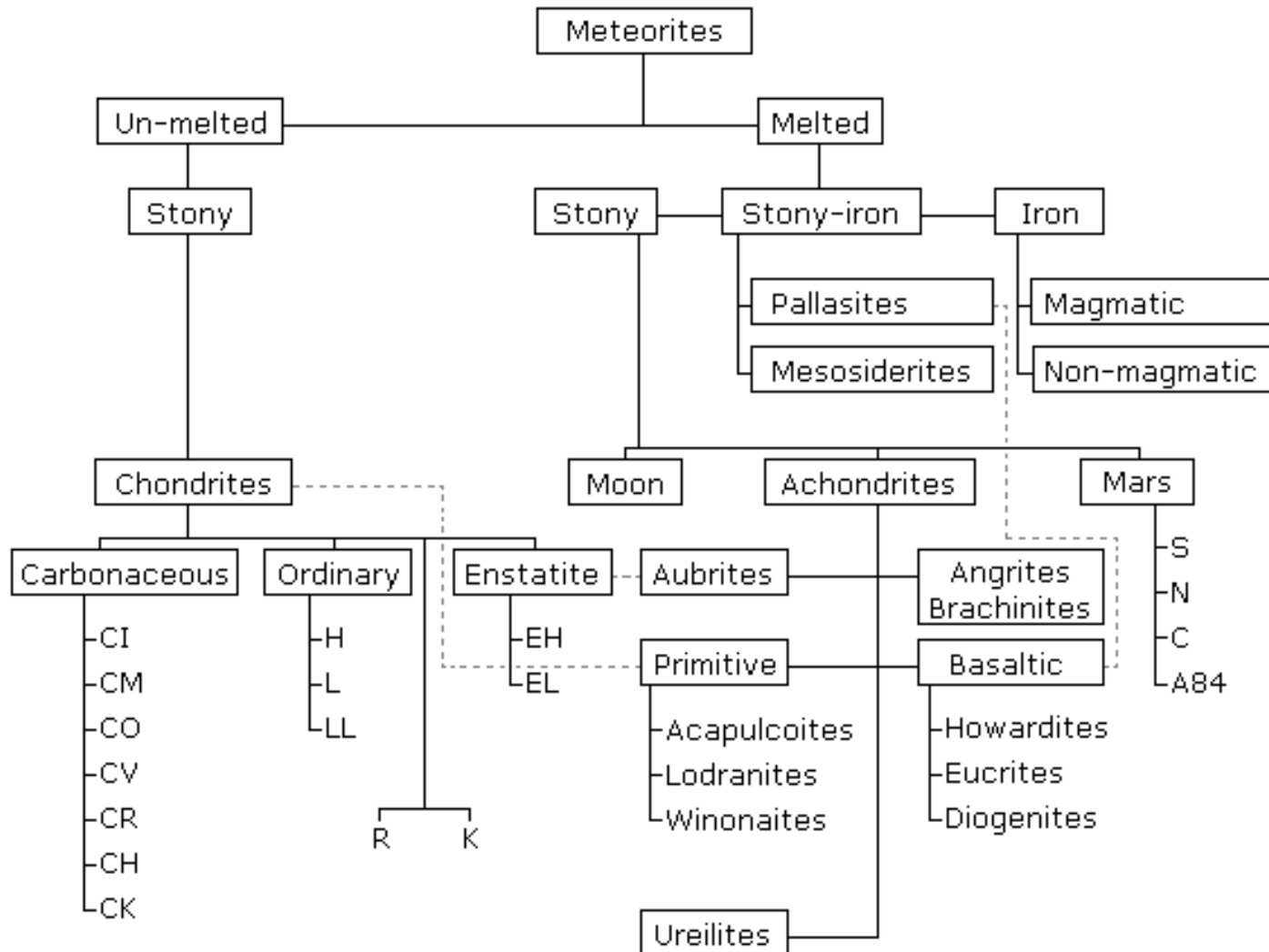
- . Showered an area about 50 km x 10 km with over 4 tons of fragments.

Fragments containing calcium-aluminum-rich inclusions (CAIs)

Extremely temperature-resistant materials.

Allende meteorite is a very old sample of solar-
nebula material!

Meteorite "family tree"



The Origins of Meteorites



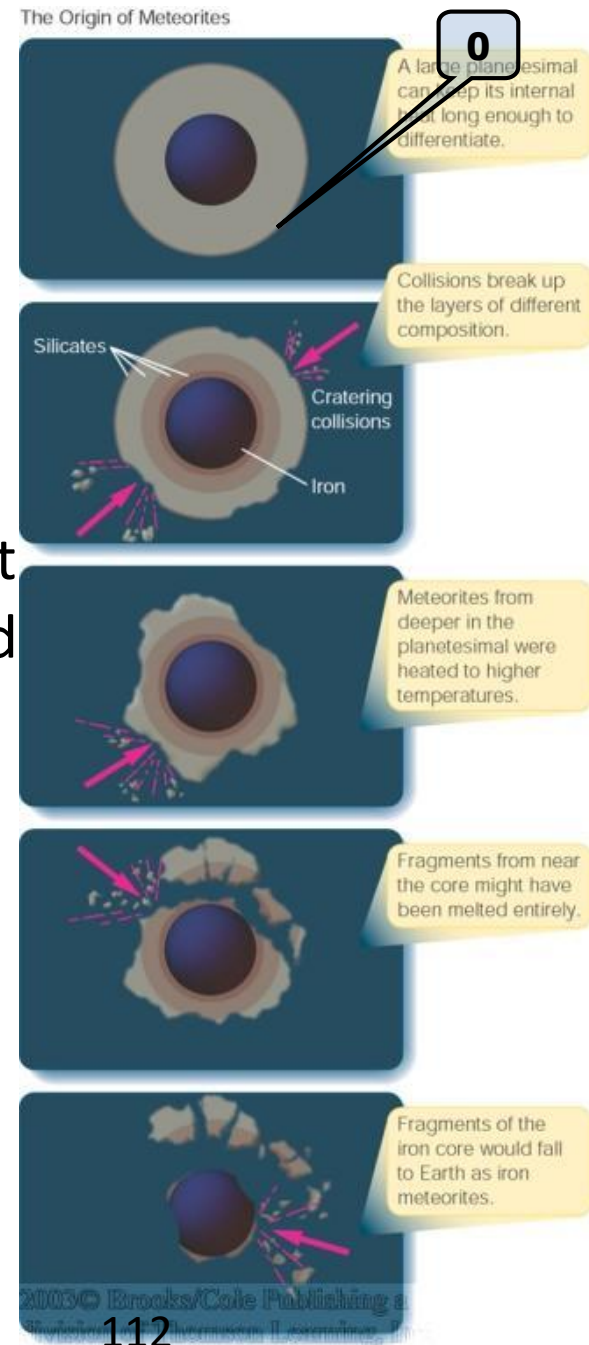
0

- Probably formed in the solar nebula, ~ 4.6 billion years ago.
- Almost certainly not from comets (in contrast to meteors in meteor showers!).
- Probably fragments of stony-iron planetesimals
- Some melted by heat produced by ^{26}Al decay (half-life ~ 715,000 yr).
- ^{26}Al possibly provided by a nearby supernova, just a few 100,000 years before formation of the solar system (triggering formation of our sun?)

The Origins of Meteorites (2)

- Planetesimals cool and differentiate
 - Collisions eject material from different depths with different compositions and temperatures.
 - Meteorites can not have been broken up from planetesimals very long ago
- ☐ so remains of planetesimals should still exist.

☐ **Asteroids**



Bibliografía

·**21^{st.} Century Astronomy.** Jeff Hester et. al. 1^{era.} Ed. 2002.

·**Astronomical Today.**

·**Fundamental Astronomy.** Hannu Karttunen et al. 5^{ta.} Ed. 2007. Springer.