

***I. Teoría del “Big Bang” y Origen del Universo***  
***II. Composición de Meteoritos y Asteroides***

Andrea Sosa  
asosa@cure.edu.uy

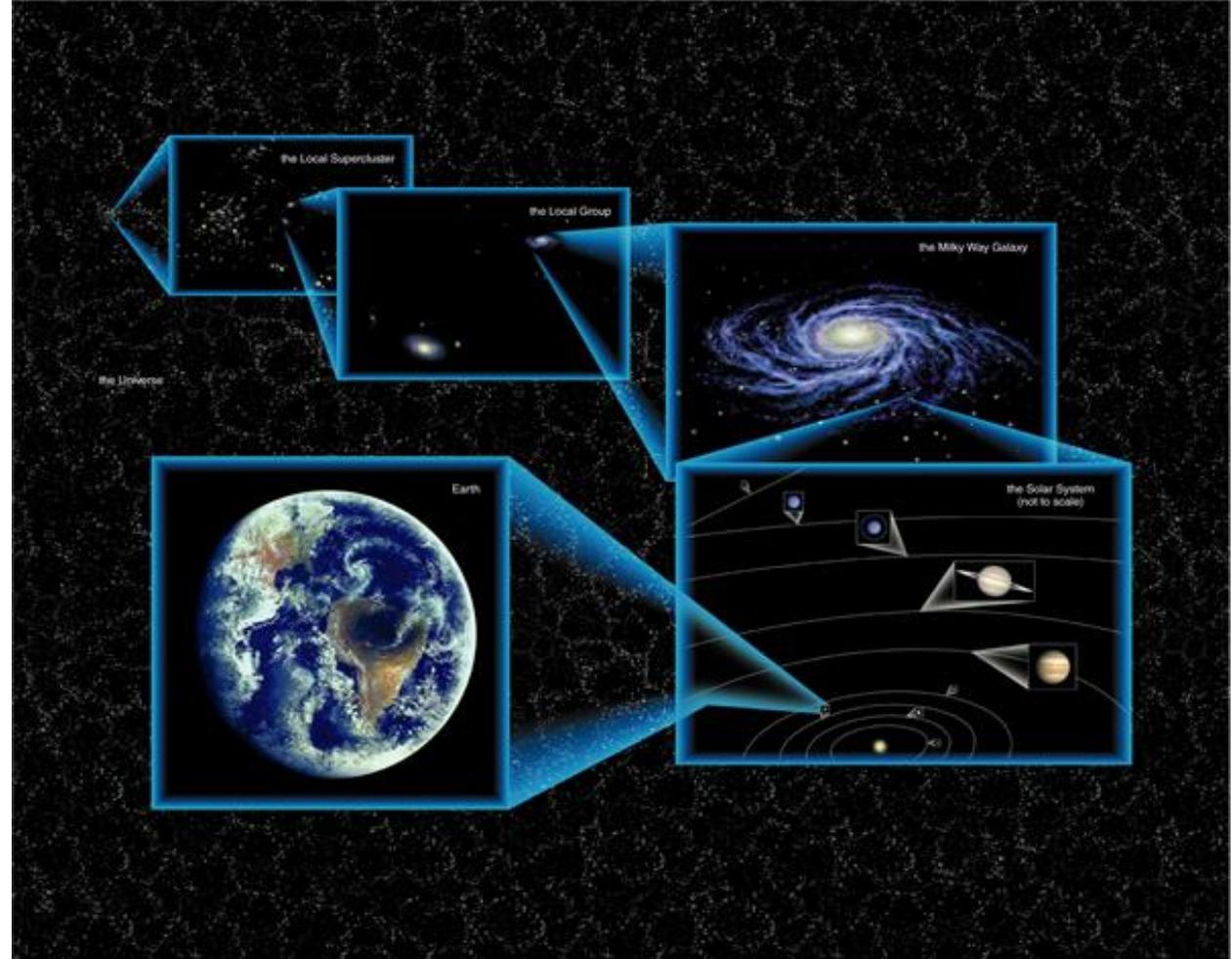
***Geología y Geomorfología***

Licenciatura en Gestión Ambiental

CENTRO UNIVERSITARIO REGIONAL DEL ESTE

21 de marzo, 2019

# el 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.

(Fig. 1.1, *The Cosmic Perspective*)

# 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**.



***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.

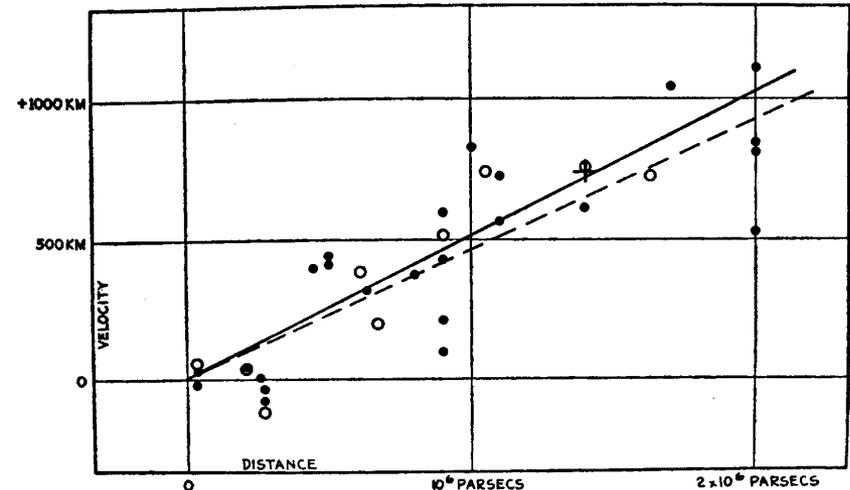
Salvo un par de estrellas de campo, todos los objetos son galaxias, y algunas de ellas son los objetos más lejanos jamás observados, tal vez galaxias en formación, a menos de mil millones de años tras el *Big Bang*.

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

# La ley de Hubble - Lemaitre

- 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 - Lemaitre**", 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 curso "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

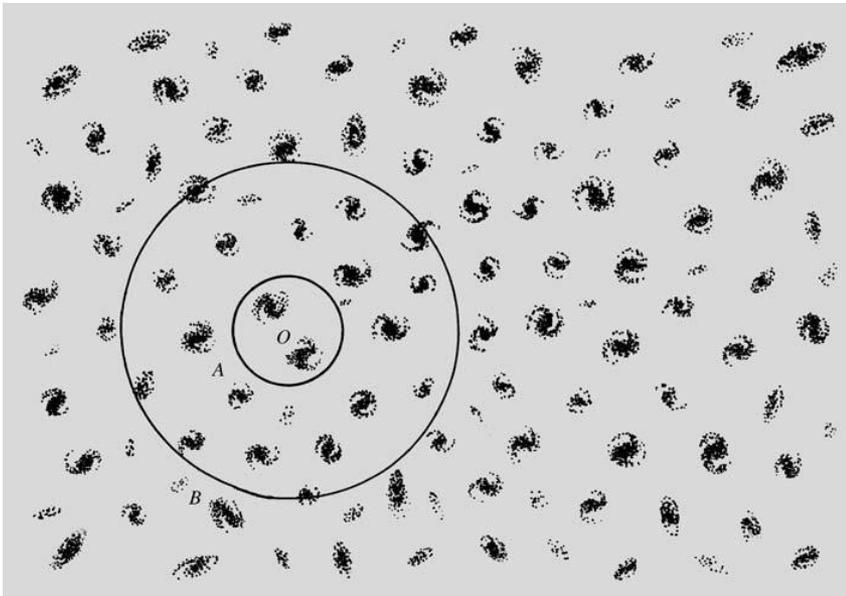
- Hubble atribuyó el corrimiento observado en las líneas espectrales de las galaxias más lejanas al efecto doppler, pero estrictamente la causa es la expansión del universo (de acuerdo al modelo cosmológico estándar actual).
- Para distinguir el corrimiento al rojo “recesional” de aquél producido por 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**.

# El principio cosmológico

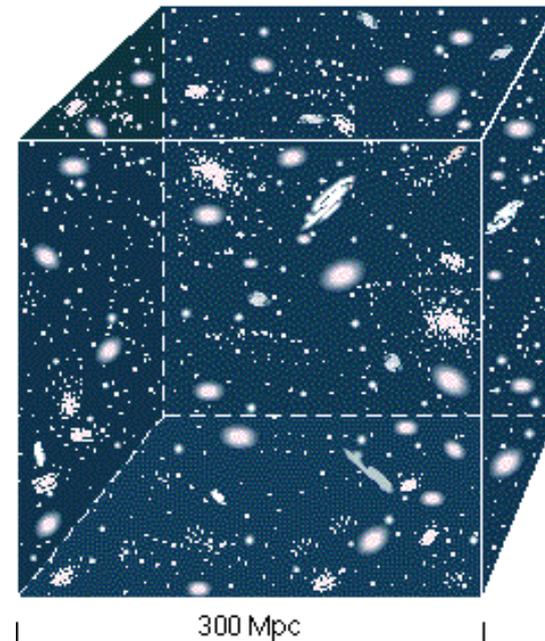
- La cosmología moderna se apoya en el principio cosmológico, el cual parece ser consistente con las observaciones: “el universo es **homogéneo** e **isotrópico**” (a escalas de cientos de Mpc).
- **Homogeneidad**: el universo luce igual independientemente del lugar desde donde lo observe.
- **Isotropía**: 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 5<sup>th</sup>. 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*).

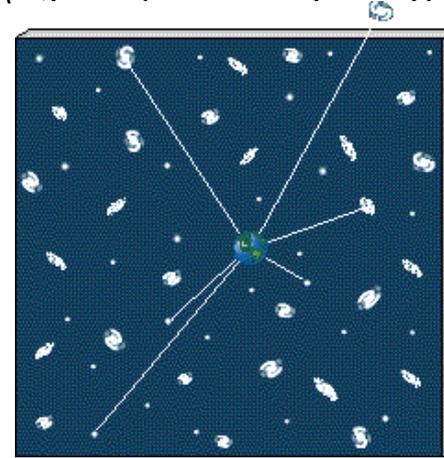
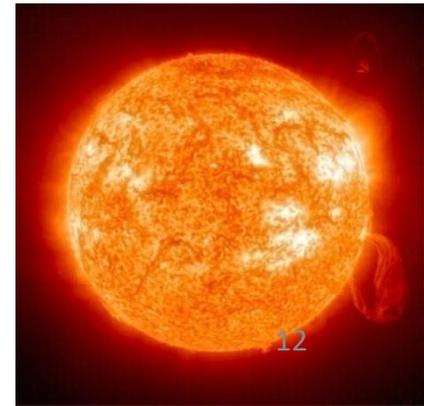


Fig. 19.1, *Fundamental Astronomy 5<sup>th</sup> Ed.* The Olbers paradox. A two-dimensional analogy can be found in an optically thick pine forest where the line of sight meets a trunk wherever one looks. (Photo M. Poutanen and H. Karttunen)

# 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:

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

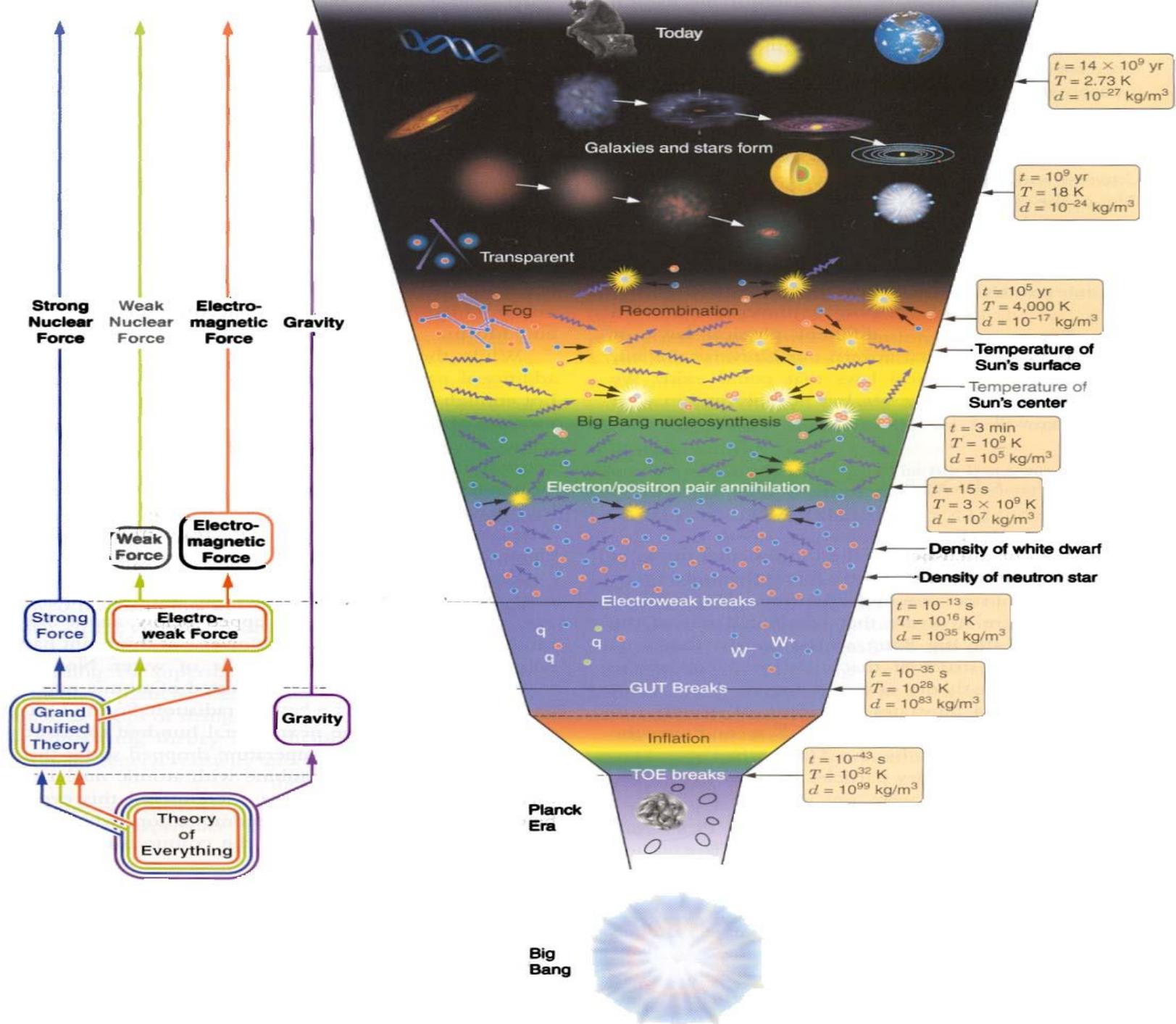
- Para  $H_0 = 71 \text{ km/s/Mpc}$  obtendríamos un tiempo de unos 14 Gyr.
- Notar que el tiempo obtenido es independiente de la distancia: las galaxias que se encuentran al doble de la distancia, se están alejando dos veces más rápido.
- La ley de Hubble implica que en algún momento del pasado (p.ej. hace unos 14 Gyr), todas las galaxias estaban juntas: toda la materia y la radiación del universo estaban confinados en un único “punto”, que luego habría explotado.
- Las ubicaciones y velocidades actuales de las galaxias serían consecuencia de esta explosión primordial conocida como *Big Bang*, en la cual se habría originado el universo.

# 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  **$T = (2.725 \pm 0.001) \text{ K}$** . La energía media de los fotones del CMB corresponde a una longitud de onda de unos 2 mm.

# 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  $\sim 3$  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  $\sim 3$  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).

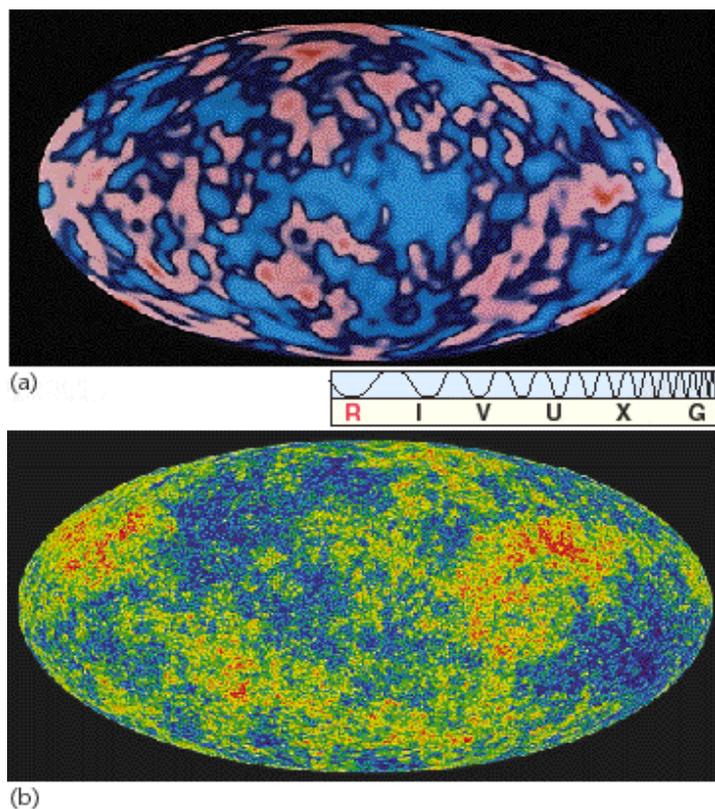
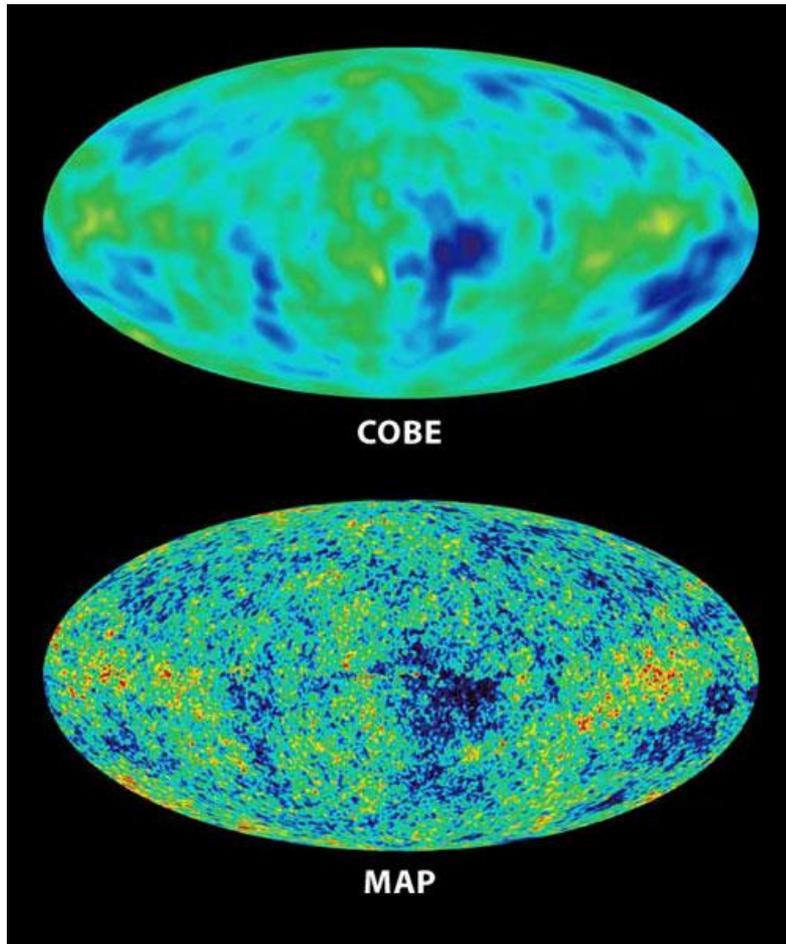


Figure 27.16 (a) COBE map of temperature fluctuations in the cosmic microwave background. Hotter-than-average regions are shown in red, cooler-than-average regions in blue. The total temperature range shown is  $\pm 200$  millionths of a kelvin. (b) Simulated map of microwave background temperature fluctuations corresponding to the simulation shown in Figure 27.15. Dark blue and red represent temperature variations of  $\pm 200$  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  $0.5^\circ$ —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.
- $H_0 = 71 \pm 4$  km/sec/Mpc

# 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.

# 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  $10^9$ ).
- **Todo lo que conocemos esta formado por la esa pequeña parte de materia en exceso!**
- Los protones y neutrones se “condensaron” en  $t = 0.0001$  s ( $T < 10^{13}$  K). Los electrones lo hicieron al minuto ( $T < 10^9$  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 <sup>3</sup> ]	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	$15$ - $20 \times 10^9$ a	$5 \times 10^{-30}$ - $5 \times 10^{-31}$	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/cm<sup>3</sup>, mientras que la densidad de materia de sólo 0.1-1.0 g/cm<sup>3</sup>

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

# 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%**

# Meteoritos

- Un **meteorito** es una roca que cayó del cielo.
- Antes de ingresar a la atmósfera, fue un **meteoroide** (o un **asteroide** si era más grande), y después se vuelve un **meteoro** mientras se vuelve incandescente por la fricción atmosférica.
- Un meteorito que explota en su pasaje por la atmósfera se conoce como **bólide**).
- Se denominan **caídas** a los meteoritos que fueron observados antes de impactar en la superficie, y hallazgos a los que sólo fueron encontrados en la superficie.

# ¿Sabías la diferencia?

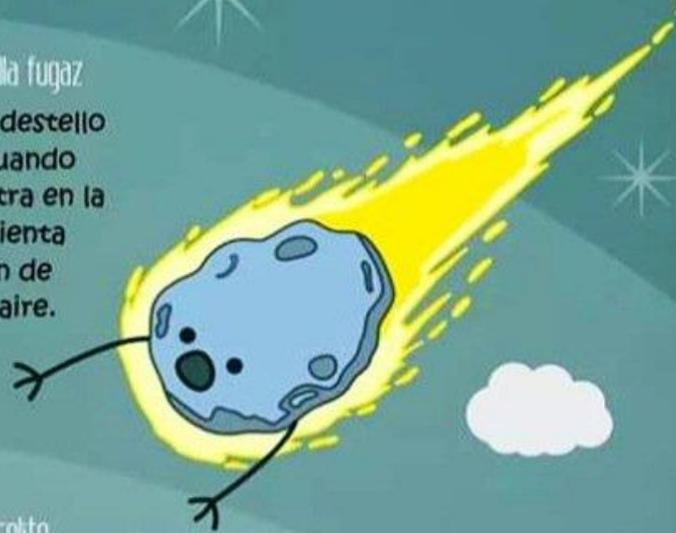
## Meteoroide

Cuerpo celeste mayor que el polvo cósmico pero menor que un asteroide.  
(Desde 100 micrómetros hasta 50 metros aprox.)



## Meteoro / Estrella fugaz

Estela luminosa o destello que se produce cuando un meteoroido entra en la atmósfera y se calienta debido a la presión de choque contra el aire.



## Meteorito / Aerolito

Roca proveniente del espacio que no se desintegró al atravesar la atmósfera y terminó chocando contra la superficie terrestre.



# Las bolas de fuego o bólidos





### Asteroide

Corpo rochoso que orbita uma estrela maior que um meteoróide. Alguns já atingiram a Terra\*



### Cometa

Pedras de gelo originárias de regiões externas do Sistema Solar e que são atraídas pela gravidade dos maiores planetas. O Sol faz com que o núcleo emita gases e poeira, o que forma a cauda. Alguns têm órbitas regulares, mas outros são vistos apenas uma vez

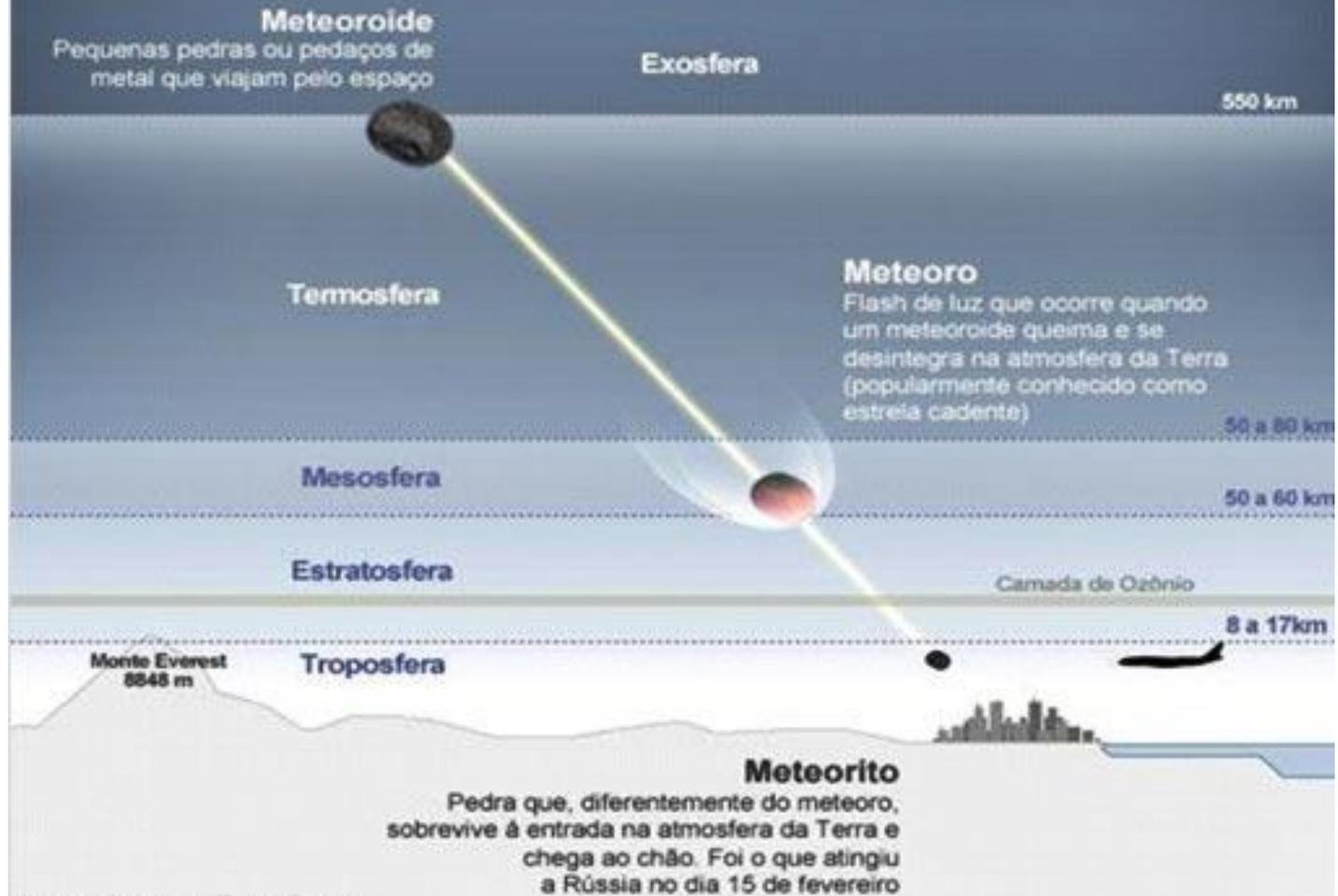
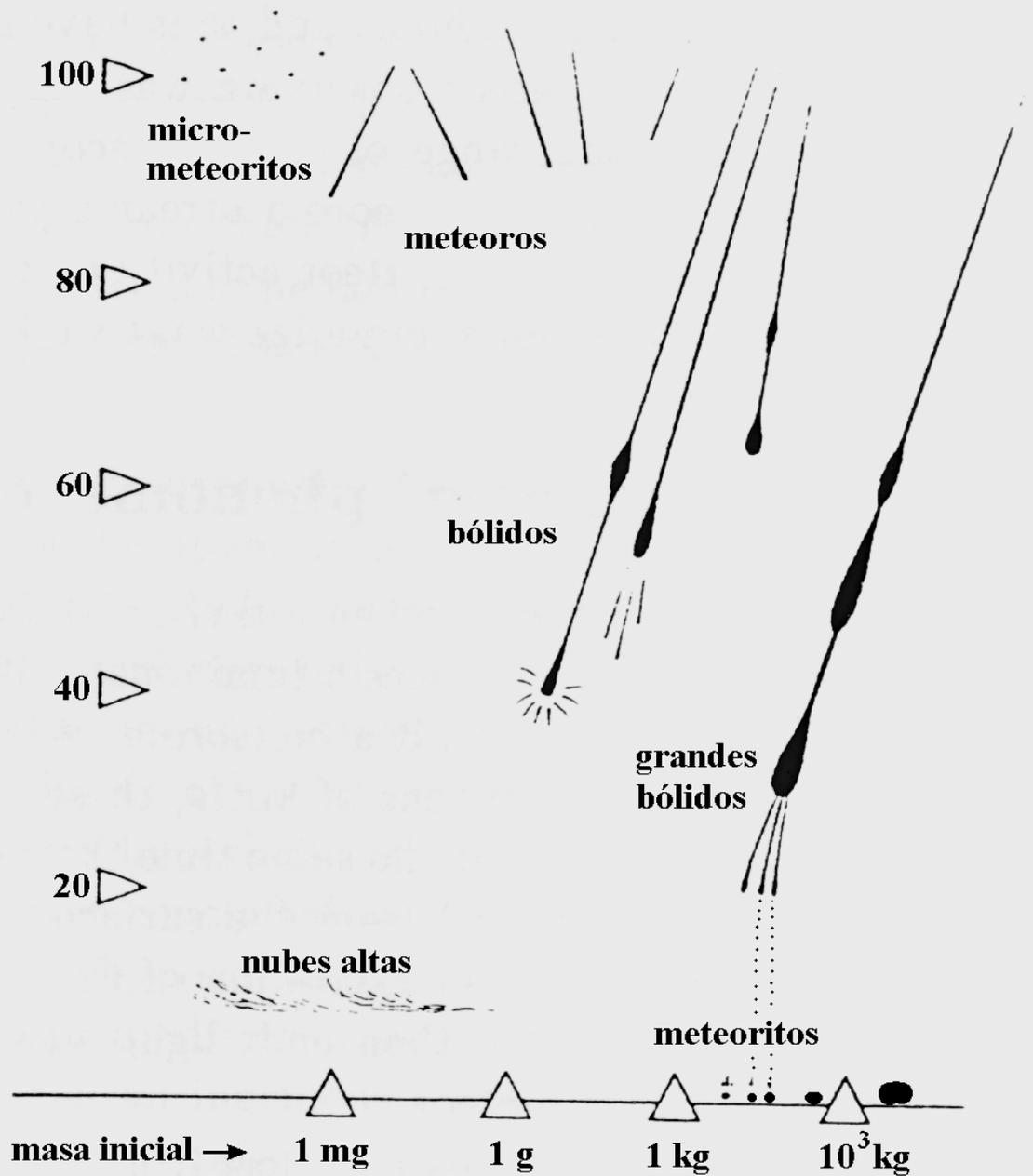


Ilustração: Arte / Terra Brasil

Altura (km)



# TERMINOLOGÍA DE METEOROS

AMERICAN METEOR SOCIETY - [WWW.AMSMETEORS.ORG](http://WWW.AMSMETEORS.ORG)



## ASTEROIDE

Fragmento rocoso o de hierro que se mueve por el espacio.

*Desde 1 metro hasta cientos de kilómetros.*



## COMETA

Un cuerpo sólido compuesto por hielo, roca y gases congelados. A medida que se fracturan y desintegran, algunos cometas dejan un rastro de residuos sólidos en el espacio.

*Núcleo (parte sólida): del orden de kilómetros.  
Cola: millones de kilómetros.*



## METEOROIDE

Un asteroide pequeño.

*Desde unas micras hasta 1 metro*

Un meteorito pequeño  
Desde unas micras hasta 1 metro

### LLUVIA DE METEOROS

Un suceso anual, cuando la Tierra pasa a través de una región que tiene gran concentración de restos, como las partículas desprendidas de los cometas. Desde la Tierra, parece como si los meteoros partieran radialmente, del mismo punto del cielo.

### METEORO

La luz emitida por un meteoroide o asteroide al entrar en la atmósfera:

### BÓLIDO

Un meteorito más brillante que el planeta Venus.

### SUPERBÓLIDO

La luz emitida por un meteoroide grande o un asteroide cuando explota en la atmósfera (más brillante que la Luna llena).

### METEORITO

Un fragmento de un meteoroide o asteroide que resiste el paso por la atmósfera y llega a caer en el suelo.  
Desde unos gramos a varias decenas de toneladas.



# METEOROIDE

Fragmento de materia sólida interplanetaria, de diámetro inferior a 10 m, que orbita alrededor del Sol

Si entra en la atmósfera terrestre

Puede

Produce

Vaporizarse completamente

No vaporizarse completamente

Efecto luminoso

Efecto sonoro

Cae a la Tierra como polvo

Llega a la superficie golpeándola

Estela luminosa

Estampido sónico

Se llama

Brillante

Muy brillante

**METEORITO**

**METEORO**  
(Estrella fugaz)

**BÓLIDO**  
(fireballs)

Debido a la velocidad de entrada, que oscila entre 1800 y 8400 Km/h

# Algo de historia...

- (fig. 8.1, Planet. Sci.). Ilustración sobre la caída de un meteorito el 7 de noviembre de **1492** en Ensisheim, **Alsacia**. Es el registro más antiguo de una caída de la cual se conserva material.
- La caída más antigua registrada corresponde al meteorito de **Nogata**, el 19 de mayo de **861**.

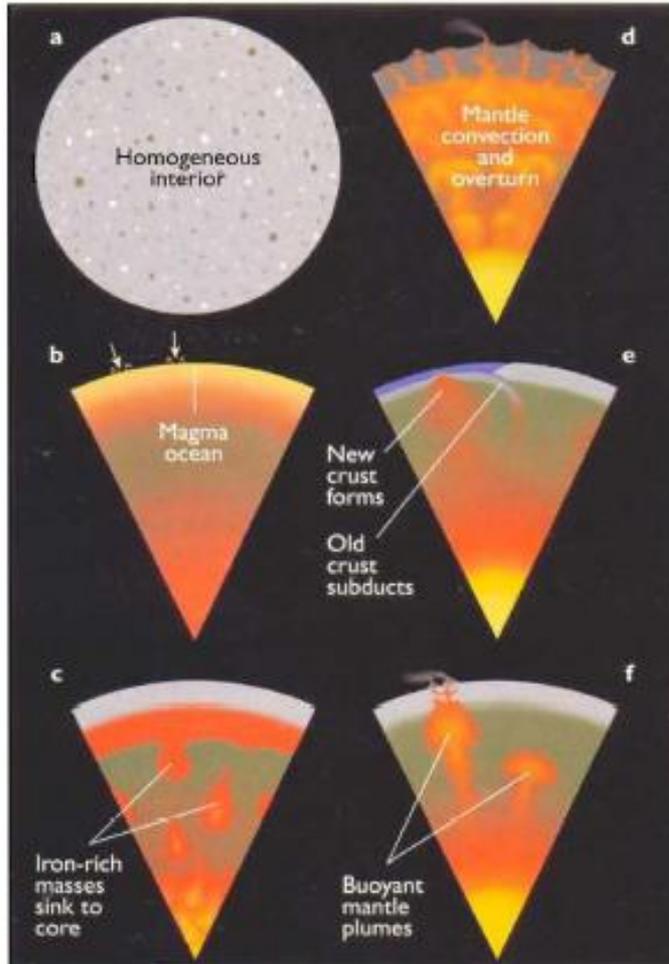
# Algo de historia...

- Si embargo, aún durante la Ilustración (S. XVIII), para muchos era difícil aceptar que existieran piedras que podían caer del cielo, y los reportes de caídas eran tratados con escepticismo.
- El reconocimiento del **origen extraterrestre** de los **meteoritos** comenzó a aceptarse alrededor de **1800**, a partir del estudio bien observado y documentado de algunas caídas en Europa, y del descubrimiento de los primero cuatro asteroides (cuerpos celestes de tamaño sub-planetario).

# Origen e importancia de los meteoritos

- **Muestras** de otros mundos que pueden ser analizadas en laboratorios terrestres.
- La gran mayoría **son fragmentos de pequeños asteroides.**
- Los meteoritos más primitivos contienen cantidades moderadas de hierro, y provienen de **planetesimales** que no llegaron a fundirse.
- Los meteoritos más ricos en hierro presumiblemente provengan de los núcleos de planetesimales **diferenciados** y luego fragmentados.

## 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.

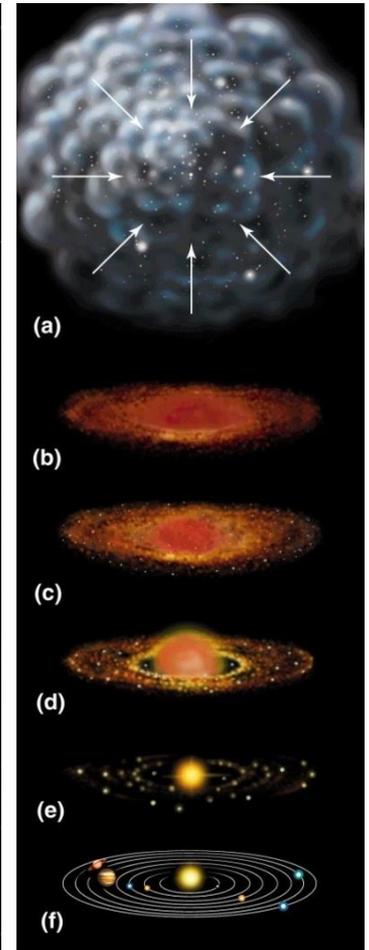
# Origen e importancia de los meteoritos

- En cambio, los meteoritos con bajo contenido de hierro serían muestras de las capas más externas de los planetesimales diferenciados.
- Dado que los objetos más pequeños se enfrían más rápido, los progenitores de la mayoría de los meteoritos nunca llegaron a calentarse lo suficiente, o se enfriaron y solidificaron en épocas más tempranas de la formación del sistema solar.

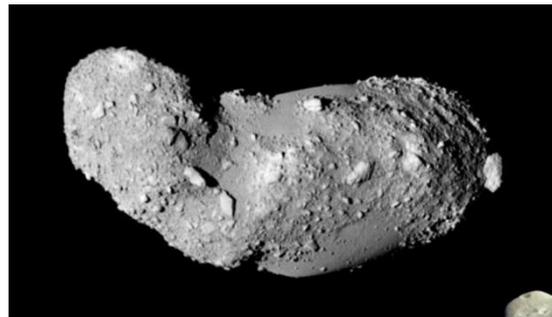
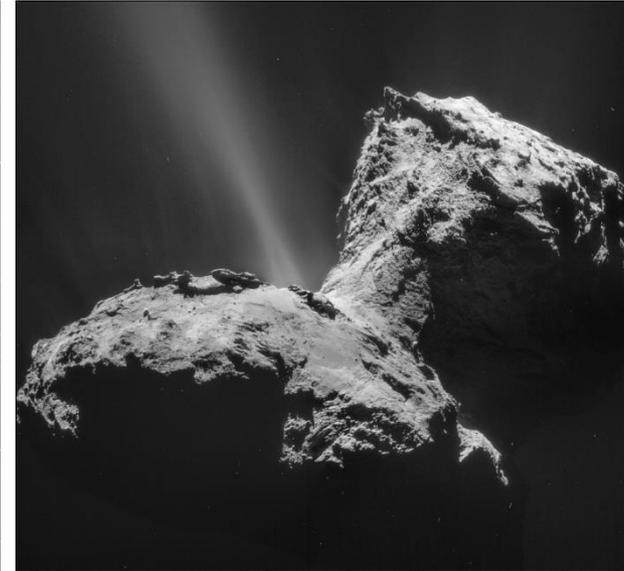
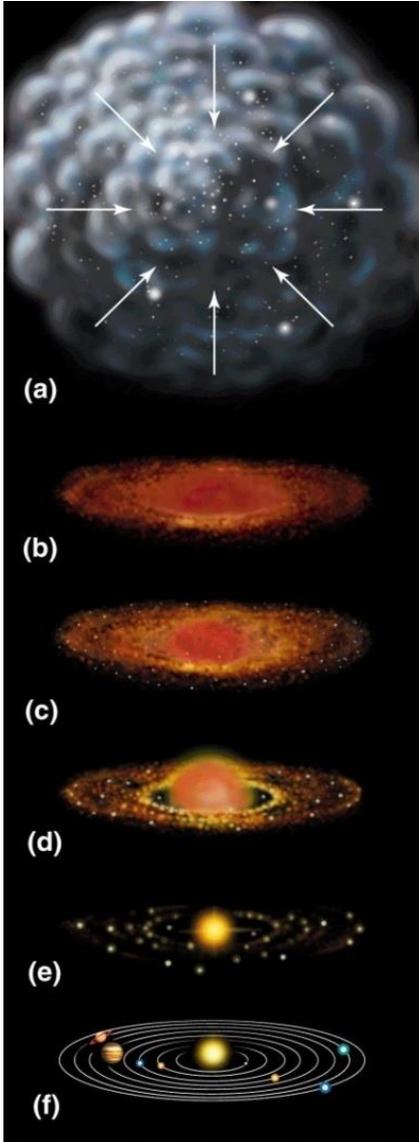
# Origen e importancia de los meteoritos

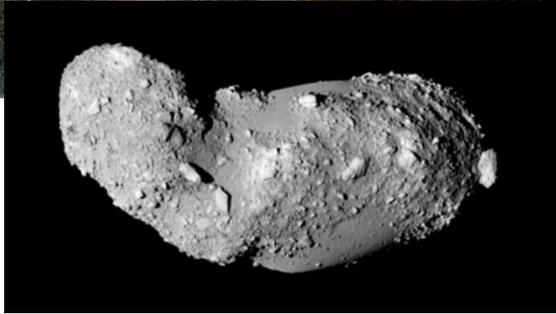
- En consecuencia, muchos meteoritos preservan un **registro de épocas más tempranas de la historia de la formación de nuestro sistema planetario.**
- Tales registros fueron “barridos” en los planetas geológicamente activos como la Tierra.

- 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*.

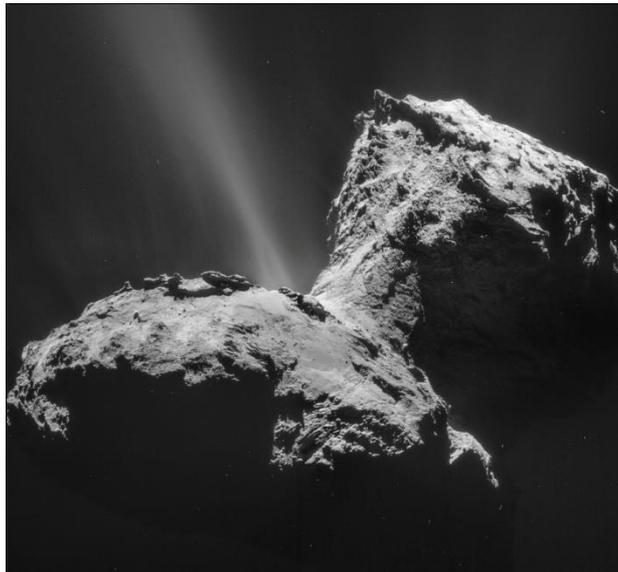


# Cometas y Asteroides: residuos de la formación planetaria



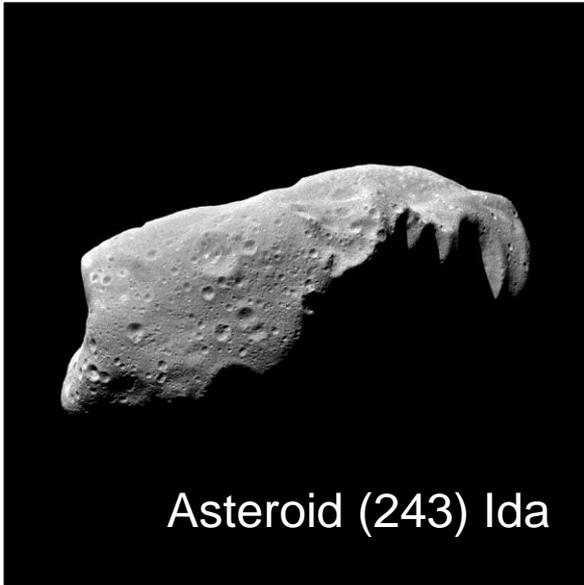


- Júpiter se formó en menos de 10 millones de años...
- Mientras la Tierra lo hizo en unos 100 millones de años.
- Cometas y Asteroides: *residuos de la formación planetaria.*



# Cuerpos menores del Sistema Solar

## Asteroides



Rocosos/Metálicos

## Cometas



Volátiles congelados y polvo

Remanentes de la acreción planetaria.

# Clasificación básica de meteoritos

- La clasificación tradicional se basa en su apariencia y composición.
- Los meteoritos metálicos son más fáciles de distinguir de las rocas terrestres comunes.
- **Metálicos (*Irons*)**: contienen principalmente **hierro**, con una cantidad significativa de **níquel** y menores cantidades de **elementos siderófilos** (oro, cobalto y platino).

# Clasificación básica de meteoritos

- **Pétreos (*Stones*)**: aquellos que no contienen cantidades significativas de metales.
- **Pétreo-metálicos (*Stony-irons*)**: aquellos con cantidades comparables de metales y roca.

Otra clasificación se basa en el origen de los cuerpos:

- **Acondritas**: incluye a la mayoría de los metálicos, pétreo-metálicos y algunos pétreos. Proviene de la fragmentación de cuerpos diferenciados.

# Clasificación básica de meteoritos

- **Condritas:** También se conocen como meteoritos **primitivos**, pues provienen de cuerpos no diferenciados, y están compuestos por material formado directamente en la nebulosa solar primitiva y que luego condensó, así como de granos de polvo interestelar supervivientes. En algunos casos esos materiales fueron modificados por procesos de alteración acuosa o térmicos.

# Clasificación básica de meteoritos

- **Condritas:** en estos meteoritos se encuentran silicatos, metales, y otros minerales muy próximos entre sí.

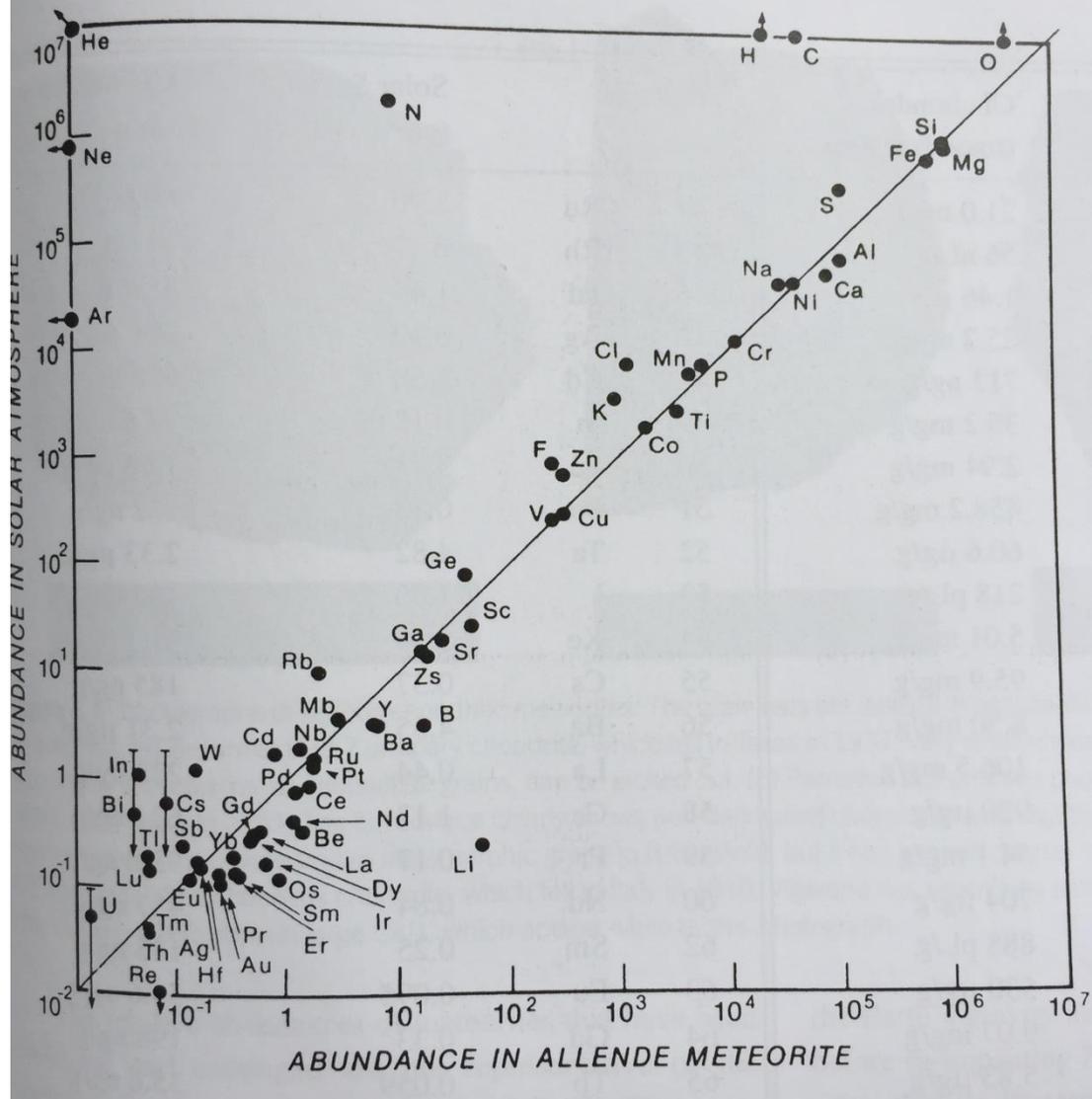
Las condritas contienen en su mayoría unas pequeñas inclusiones igneas, cuasi esféricas, denominadas **cóndrulos**, formados a partir de la solidificación de gotas de material fundido.

Algunos cóndrulos son **vidriados**, lo cual implica que se enfriaron muy rápido.

# Clasificación básica de meteoritos

- Exceptuando los elementos mas volátiles, **la composición de todas las condritas es llamativamente similar a la de la fotosfera solar** (fig. 8.2, Planet. Sci.).
- Las densidades determinadas en los meteoritos varian entre 1.7 g/cm<sup>3</sup> para la condrita carbonácea caida en Tagish Lake, Canada el 18 de Enero de 2000, hasta 7-8 g/cm<sup>3</sup> para los metálicos.

# 1 Basic Classification and Fall Statistics



# The Allende Meteorite

---



- 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!

# Clasificación de condritas segun su mineralogia y composicion

- **Condritas Carbonáceas:** mayor porcentaje en masa de carbono. Se dividen en 8 categorías: **CI, CM, CO, CV, CH, CB Y CK.**
- **Condritas Ordinarias:** se subdividen según su cociente Fe/Si en **H** (High Fe), **L** (Low Fe), y **LL** (Low Fe, Low metal). Constituyen las más comunes de las condritas.
- **Condritas Enstatitas:** el mineral dominante es el  $\text{MgSiO}_3$ .

# CLASIFICACIÓN DE METEORITOS

## NO DIFERENCIADOS

### ROCOSOS

#### CONDRIAS

- Con cándrulos: cristales de olivino o pircano en forma de bolitas de tamaño

#### CONDRIAS CARBONÁCEAS

- Su edad: 4.560 m. de a.
- Valioso para reconstruir la historia de Sistema Solar



#### CONDRIAS ORDINARIAS

- Composición similar a la corteza y manto terrestre



### ROCOSOS

#### ACONDRIAS

- Sin cándrulos.
- Textura cristalina de grano grueso
- Similar a las basaltas terrestres

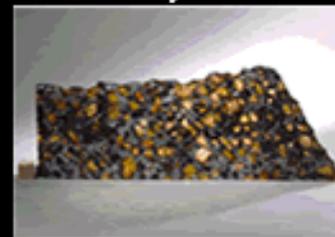


## DIFERENCIADOS

### METALO-ROCOSOS

#### SIDEROLITO

- Formados por una mezcla heterogénea de Ni-Fe y silicatos.



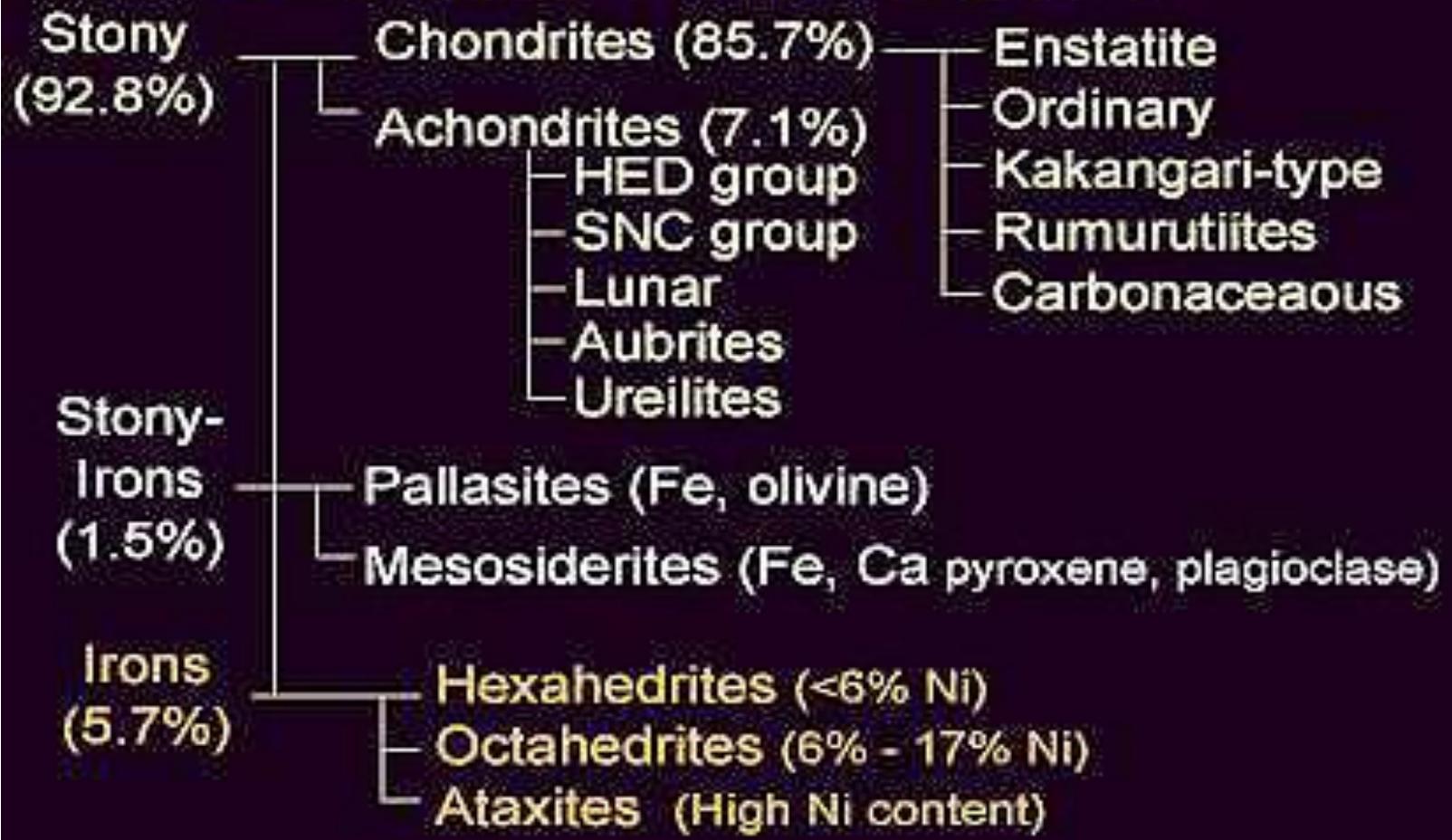
### METALICOS

#### SIDERITO

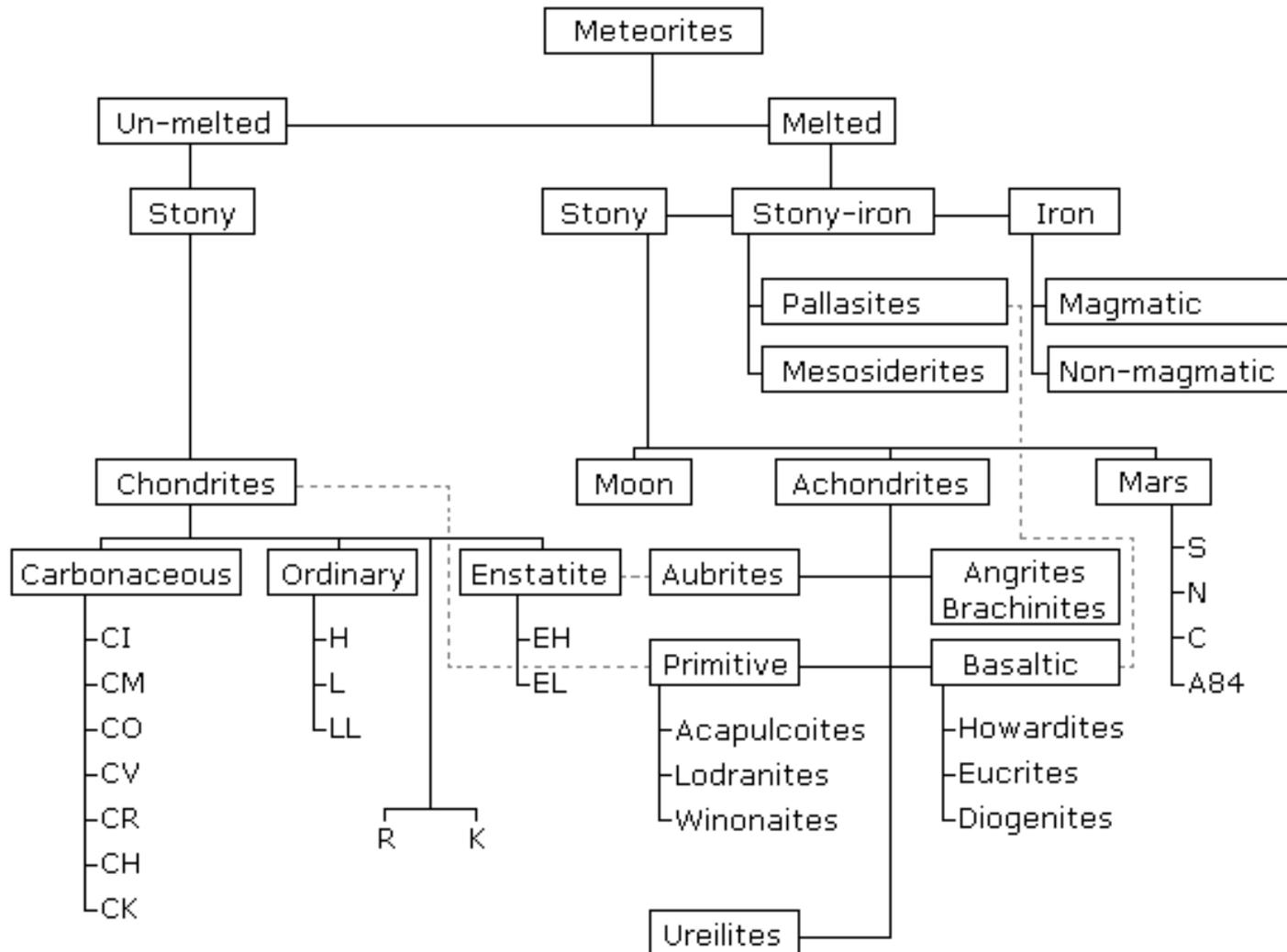
- Formados por una aleación de Fe-Ni
- Composición similar a la del núcleo



# Classification of Meteorites



# Meteorite "family tree"



# Analysis of Meteorites

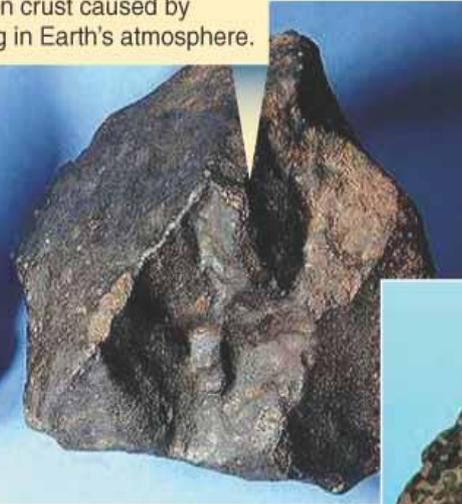
3 broad categories:

- **Iron meteorites**

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

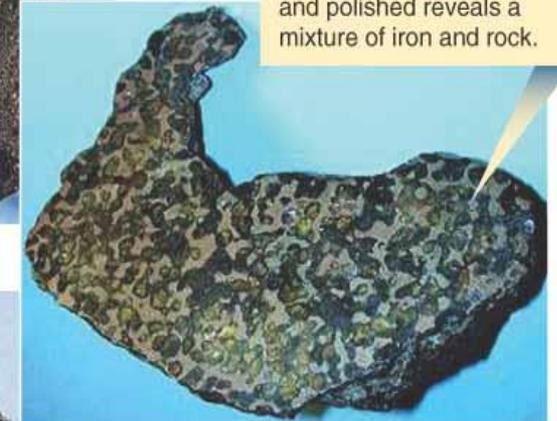


Stony meteorites tend to have a fusion crust caused by melting in Earth's atmosphere.

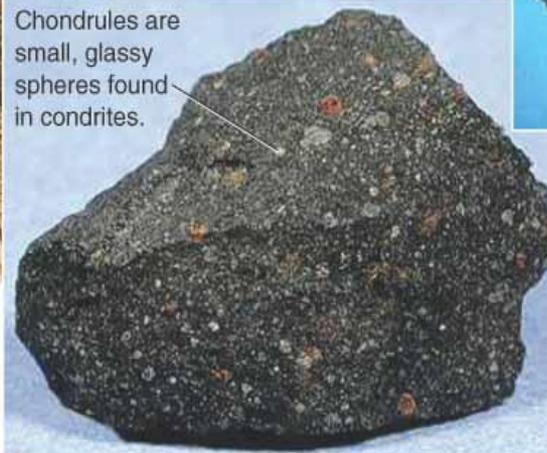


- **Stony meteorites**

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.

- **Stony-Iron meteorites**

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

# 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.



**Table 8.2** Meteorite Classes and Numbers (as of September 2008).

	Falls	Fall frequency (%)	Non-Antarctic finds	Antarctic finds <sup>a</sup>
Total cataloged	1070	—	9582	15 660
Stones	1009	94.3	8648	15 495
Chondrites	916	85.6	7964	15 082
Carbonaceous chondrites	42	3.8	319	494
Achondrites	87	8.1	684	413
Martian meteorites	4	0.4	53	9
Lunar meteorites	0		93	19
Stony-irons	12	1.1	139	56
Irons	49	4.5	795	109

Data from Meteoritical Bulletin Database (<http://tin.er.usgs.gov/meteor/metbull.php>).

<sup>a</sup> Lists the well-cataloged ANSMET collection only.

# Lluvias de meteoros

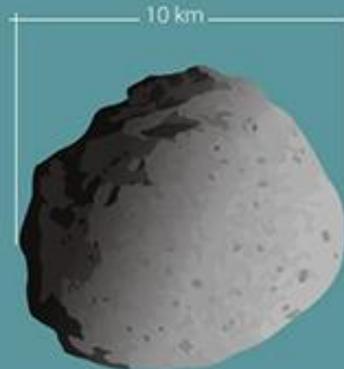
■ Table 25-1 | Meteor Showers

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

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

# Así era el meteorito que extinguió a los dinosaurios

Hace 66 millones de años, cuando México no era México, un meteorito gigante cayó sobre lo que hoy es la mexicana Península de Yucatán, entonces sumergida, y desencadenó un cataclismo que terminó con infinidad de organismos vivos. Entre ellos, los dinosaurios.



Asteroide que generó el cráter de Chicxulub

10 kilómetros de ancho

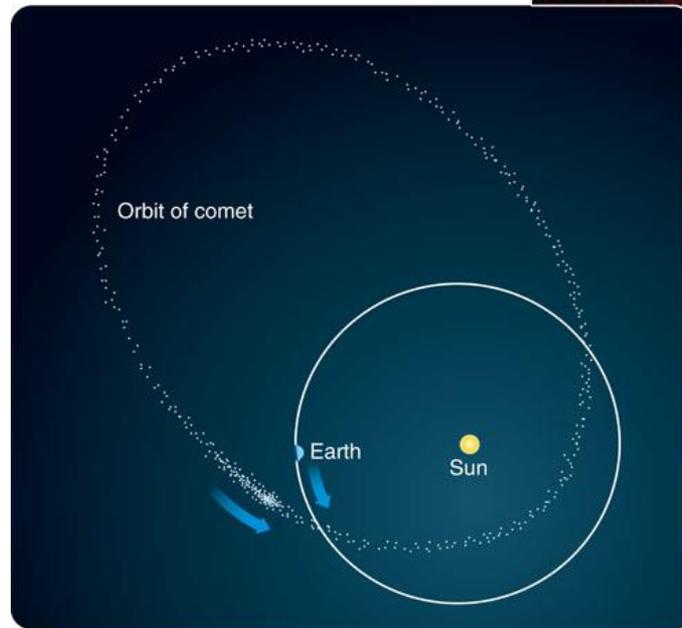


Monte Everest

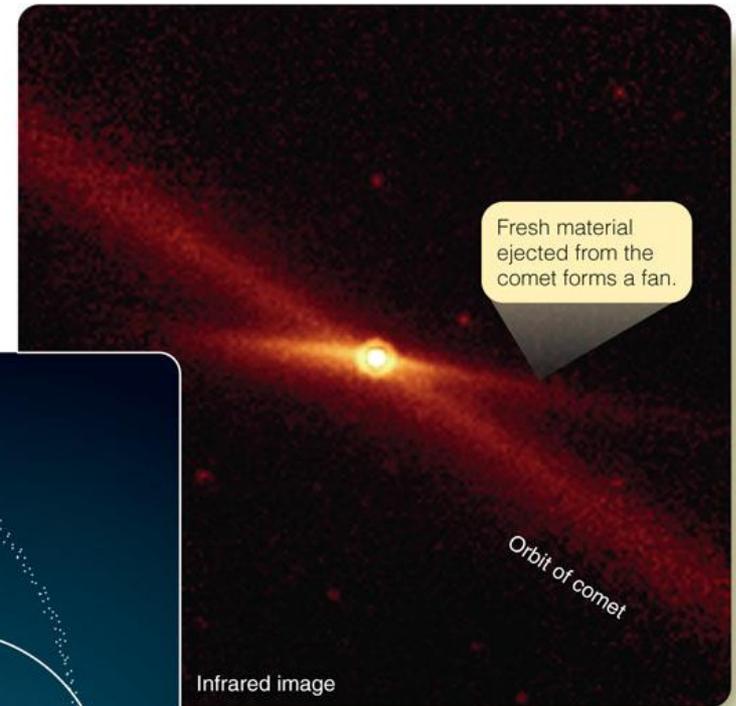
8,9 km de alto

# 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.



© 2007 Thomson Higher Education



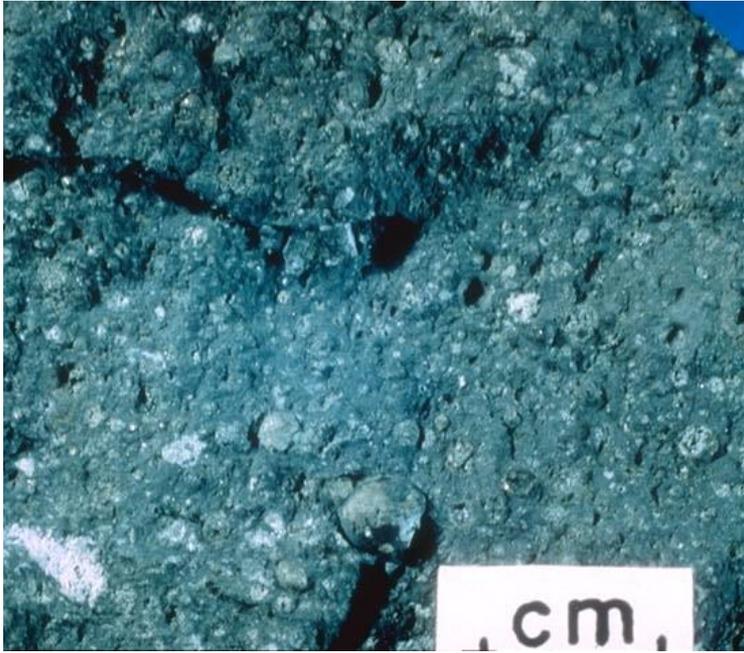
Only a few *sporadic meteors* are not associated with comet orbits.

# 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.**

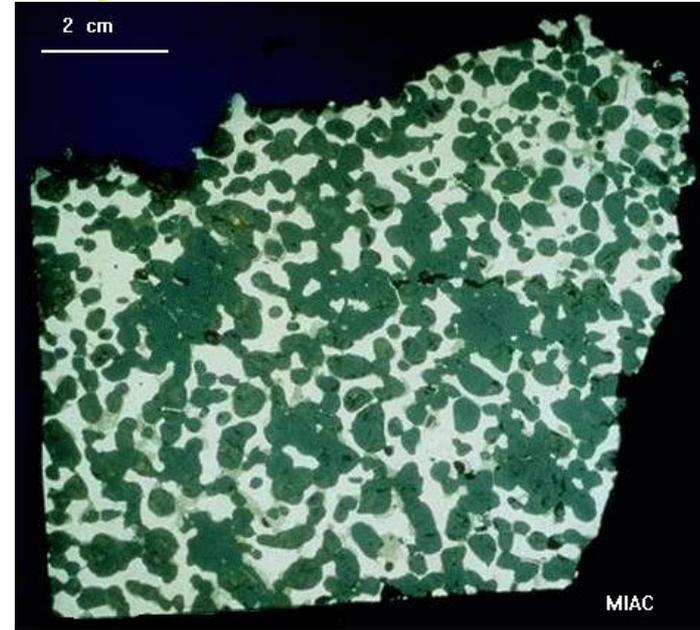


# Detalle de cada tipo

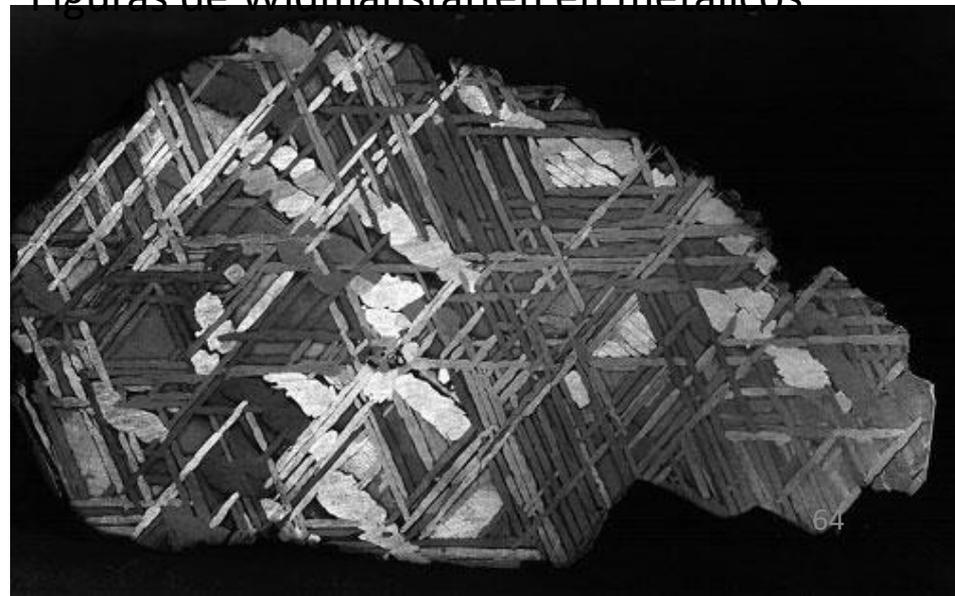
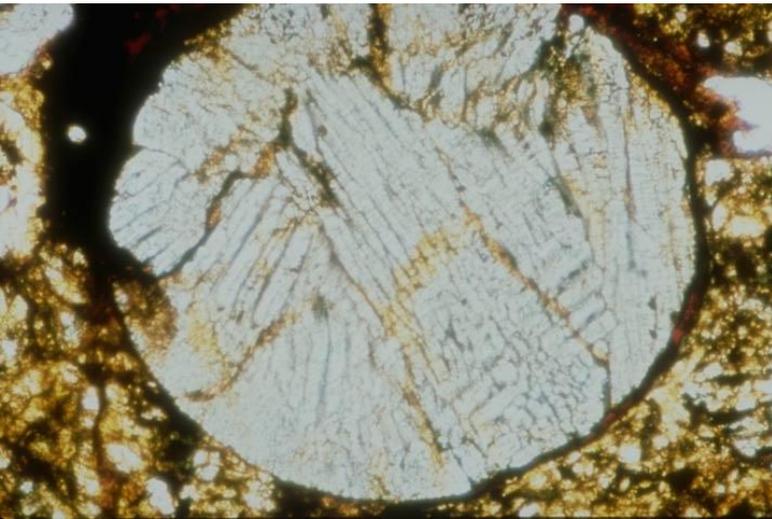


Cóndrulos en las condritas

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 Origins of Meteorites

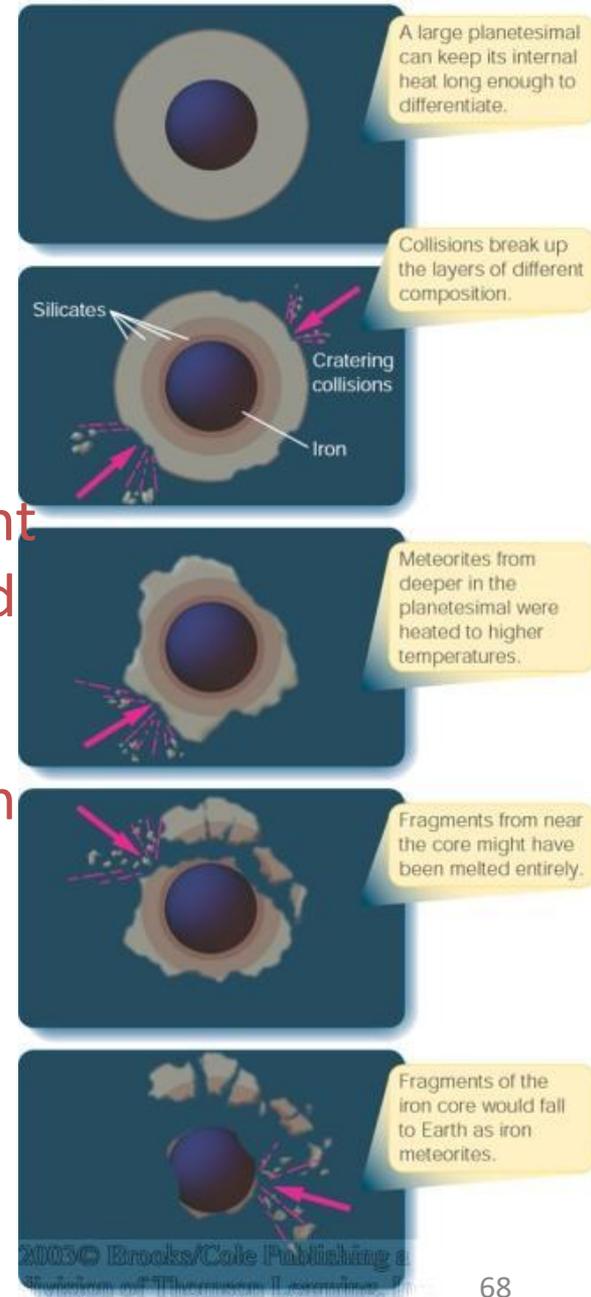
---

- 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  $^{26}\text{Al}$  decay (half-life ~ 715,000 yr).
- $^{26}\text{Al}$  possibly provided by a nearby supernova, just a few 100,000 years before formation of the solar system (triggering formation of our sun?)

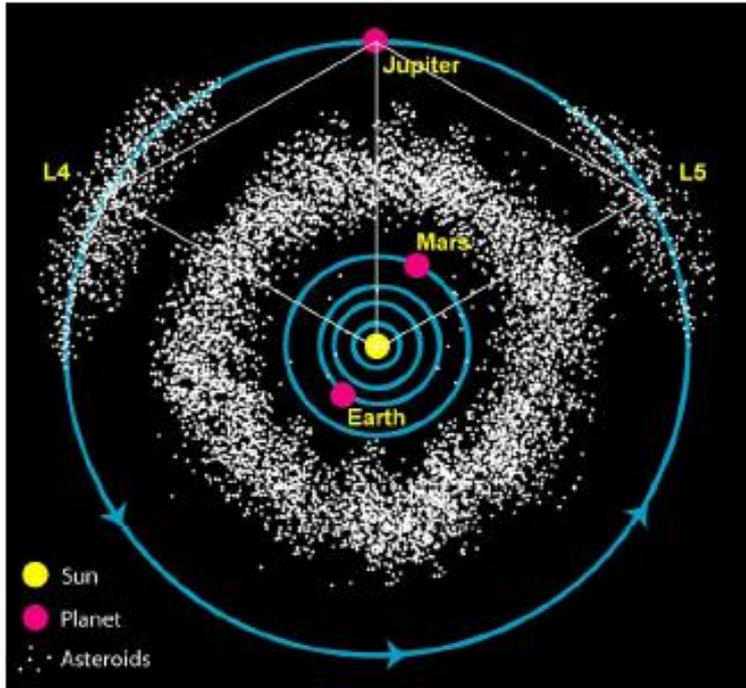
# The Origins of Meteorites (2)

- 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**

The Origin of Meteorites



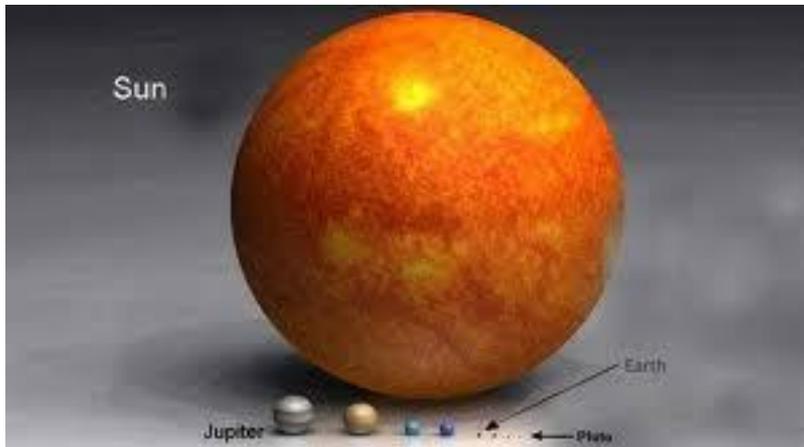
## Cuerpos pequeños del sistema solar: asteroides



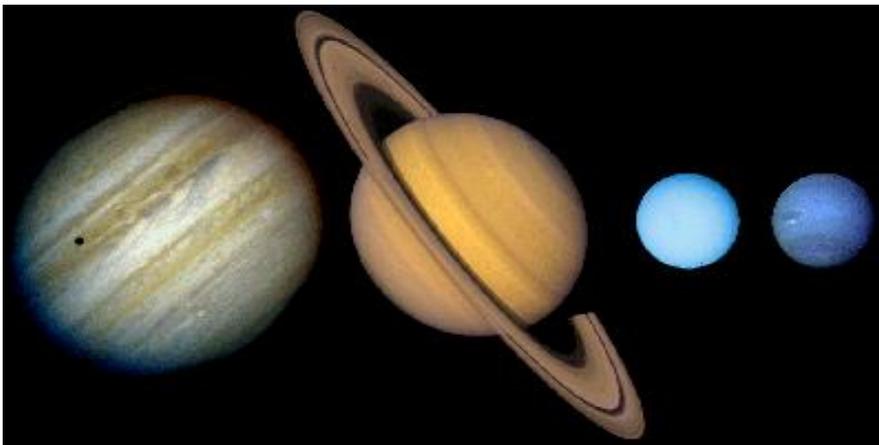
Localización espacial de los asteroides. Troyanos: se agrupan alrededor de los puntos de equilibrio dinámico L4 y L5



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



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



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

# El Cinturón de Asteroides y los Asteroides Cercanos a la Tierra

Green

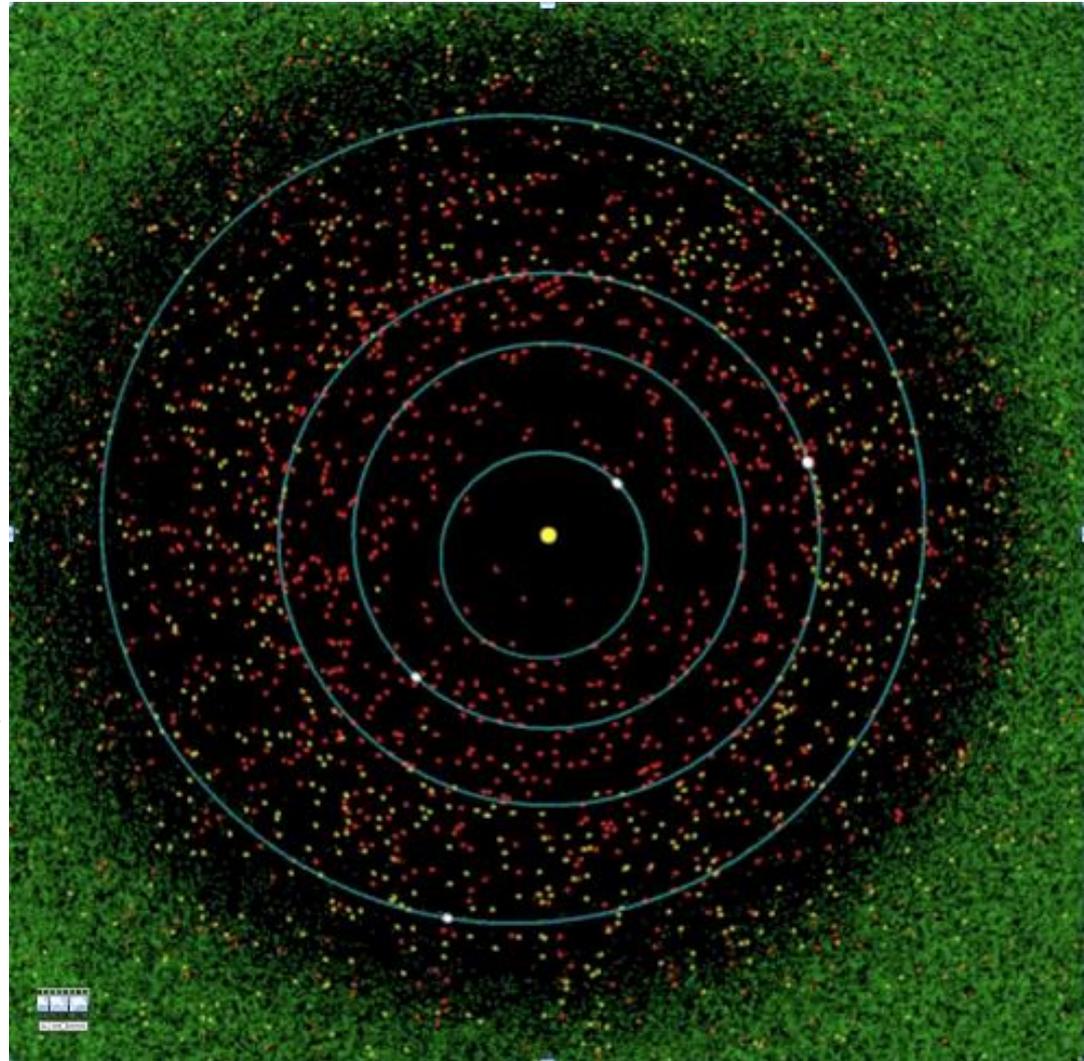
the main-belt  
of asteroids

Yellow

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

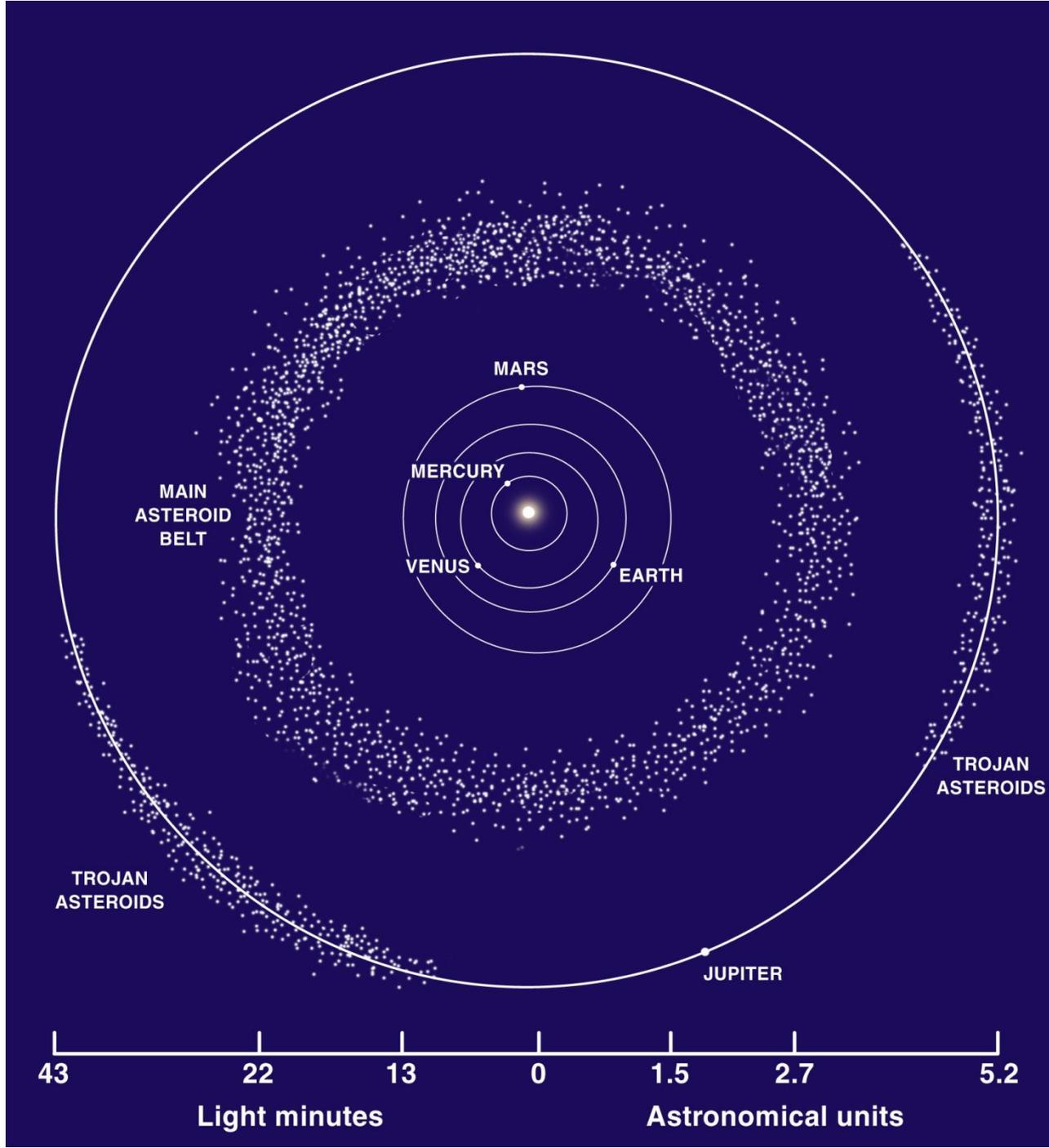
Red

asteroids  
which cross  
the orbit of the  
Earth



# Taxonomía de asteroides

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



## 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)

## 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”.