

UNIDAD 1

NUESTRO LUGAR EN EL UNIVERSO



1. COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DEL UNIVERSO

2. EL ORIGEN DEL UNIVERSO

- 2.1. Primeras ideas sobre el Universo
- 2.2. Los modernos modelos del Universo
- 2.3. Pruebas del Big Bang
- 2.4. La teoría del Big Bang
- 2.5. El futuro del Universo

3. COMPONENTES DEL UNIVERSO

4. NUESTRO LUGAR EN EL UNIVERSO

- 4.1. Nuestra galaxia: la Vía Láctea.
- 4.2. El Sistema Solar

1. COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DEL UNIVERSO

Gracias a la sonda WMAP se ha descubierto que existen tres componentes distintos en el Universo:

• Energía oscura

Representa el 74 % del total de materia-energía del Universo. Es una energía de naturaleza desconocida responsable de la aceleración de la expansión del Universo.

La **energía oscura** actúa como fuerza repulsiva en contra de la gravedad y para algunos científicos se asemeja a la **constante cosmológica** que Einstein había introducido en sus ecuaciones, aunque ahora adquiere un significado distinto. Otros científicos la atribuyen a campos de energía del vacío al que denominan **quintaesencia** (el nombre que dio Aristóteles al quinto elemento del que estaban hechos los cielos)

• Materia visible

Es la que forma las galaxias, estrellas, polvo cósmico, etc.

- 75% de Hidrógeno
- 20 % de Helio
- 5% resto de elementos químicos

Está distribuida de **forma heterogénea** en el Universo. Se concentra en determinados lugares, mientras otros quedan vacíos.

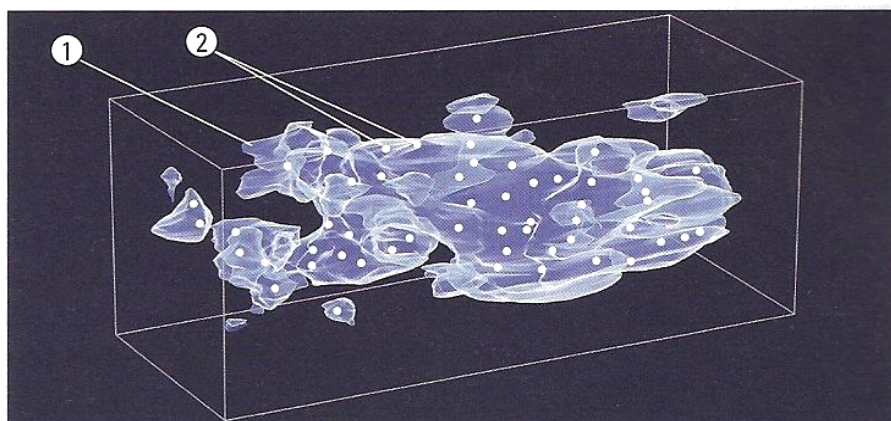
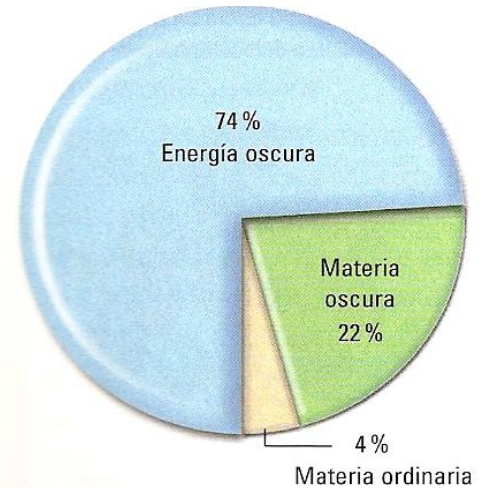
La estructura general del Universo está formada por **enormes espacios de vacío** (similares a burbujas) separados por **filamentos** de materia (galaxias). Estos filamentos presentan nodos, concentraciones de galaxias denominadas **supercúmulos** dentro de los cuales se aprecian agrupamientos llamados **cúmulos**.

Representa sólo el 4 % del total de la materia-energía del Universo, por lo que es posible que las regiones vacías no estén tan vacías. Los astrónomos suponen que pueden estar llenas de otro tipo de materia, llamada **materia oscura**.

• Materia oscura

Representa el 22% restante del total de la materia-energía.

Su naturaleza aún nos es desconocida porque no emite ni absorbe radiación electromagnética (luz, ondas de radio, etc.) que nos permita detectarla y su existencia sólo puede ser puesta en evidencia indirectamente por sus efectos gravitacionales sobre las galaxias.



Mapa tridimensional con la distribución de la materia oscura (1) en los supercúmulos de galaxias (2). Este tipo de materia podría estar formada por neutrinos y un conjunto de partículas exóticas: neutrinos, axiones, monopolos, cuerdas cósmicas, etc.

2. EL ORIGEN DEL UNIVERSO

2.1. PRIMERAS IDEAS SOBRE EL UNIVERSO

El ser humano ha sentido desde siempre la necesidad de explicar los fenómenos que observa.

Los primeros astrónomos escrutaron el cielo mes tras mes, como parte de un ritual religioso, y observaron que determinadas estrellas parece que salen justo antes que el Sol y se ponen inmediatamente después que él.

Repetieron sus observaciones año tras año e hicieron mediciones y anotaciones de los momentos y posiciones en que ocurrían estos fenómenos, llegando a la conclusión de que se repetían cíclicamente con cada estación. Se dieron cuenta de que en el cielo estaba escrito un gran calendario que les permitía predecir las estaciones favorables para la siembra, la caza y la navegación.

Desde hace más de 9000 años se han ido sucediendo unas culturas a otras, pero fueron los **babilonios** quienes las bases de la moderna **astronomía**: describieron con precisión el movimiento del Sol, la Luna y los planetas, inventaron el sistema sexagesimal (los 360° de la circunferencia) y establecieron el Zodíaco y los primeros calendarios.

a) Modelo geocéntrico

Es la hipótesis más simple que explica el movimiento de los astros y considera nuestro planeta como el centro del universo. Las observaciones que llevaron a esta conclusión fueron que:

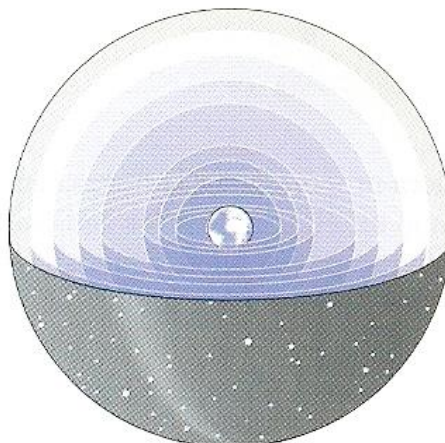
- Las «estrellas fijas» y la Vía Láctea parecían moverse durante la noche como si estuvieran rígidamente unidas a una bóveda invisible que girase alrededor de un punto fijo en el cielo. Los primeros astrónomos dedujeron que esa bóveda celeste se asemejaba a una gran esfera que rodeaba la Tierra.
- Otros astros, sin embargo, no se comportaban como las estrellas. En una época del año parecían moverse hacia delante, y en otra, hacia atrás. Estos astros se denominaron planetas.

Así, según el modelo geocéntrico según la Tierra, fija e inmóvil, ocupa el centro de una esfera celeste en la que se encuentran el firmamento, el Sol, la Luna, los planetas y las estrellas fijas.

Aristóteles (384-322 a. C.) dividía el universo en dos partes: un mundo celeste y otro terrestre.

El mundo terrestre era imperfecto y estaba formado por cuatro elementos: aire, agua, fuego y tierra. El mundo celeste, en cambio, era perfecto e inmutable. Estaba formado por el quinto elemento o quintaesencia, el éter ("eterno") y su único movimiento tenía que ser circular, porque el círculo es la figura perfecta: no tiene principio ni fin y es igual en todos sus puntos.

El Sol, la Luna, Venus, Marte y Júpiter estaban situados en sendas esferas de cristal, incluidas unas dentro de otras y la Tierra se situaba en el centro. Las estrellas eran fijas y ocupaban la esfera más externa.

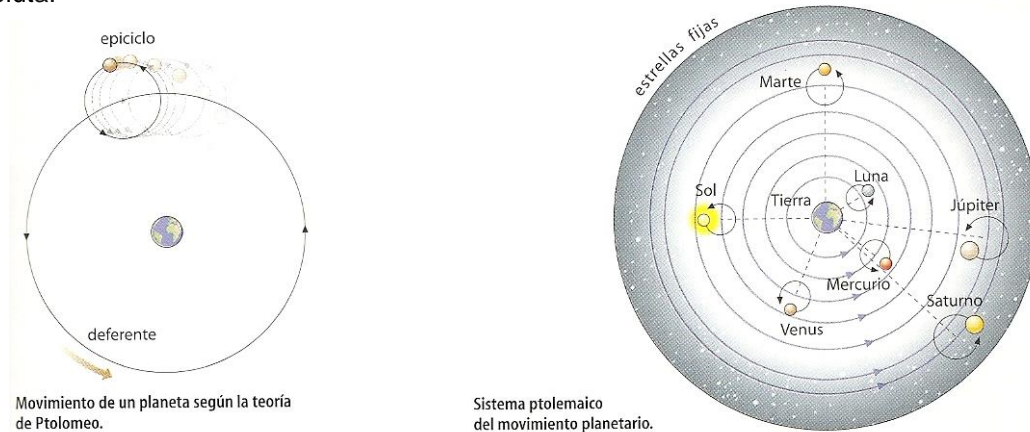


Modelo aristotélico del universo.

En el siglo II d. C., **Claudio Ptolomeo** (Egipto, 100-170 d.C.) publicó el *Almagesto*. En él afirmaba que el Sol, la Luna y los cinco planetas visibles desde la Tierra (Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno) se mueven en sus propias esferas transparentes describiendo, aparentemente, movimientos circulares.

Ptolomeo resolvió las discrepancias entre las observaciones y el modelo aristotélico estableciendo la hipótesis de que los planetas se desplazan en pequeños círculos (epiciclos), cuyo centro se mueve en una órbita circular (deferente) alrededor de la Tierra.

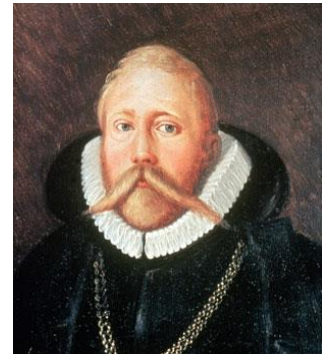
Este modelo perduró hasta el siglo XVI y se convirtió en la esencia del dogma de la Iglesia sobre la naturaleza del universo, por designio de Dios: la Tierra era el centro inmóvil de todas las cosas y el cielo, la perfección absoluta.



El astrónomo **Tycho Brahe** (Dinamarca, 1546-1601) rechazó la existencia de las esferas cristalinas que transportaban los planetas después de estudiar las trayectorias de los cometas y comprobar que se movían fuera de ellas.

Además, llegó a la conclusión de que los cielos no eran inmutables tras observar, en 1572, la aparición en el cielo de una supernova.

Para explicar el movimiento planetario propuso un modelo geocéntrico en el que los planetas giraban alrededor del Sol, y este y la luna giraban alrededor de la Tierra. Este fue el último intento de mantener el geocentrismo.



b) Modelo heliocéntrico

El primer modelo heliocéntrico fue propuesto en el siglo III antes de Cristo, por **Aristarco de Samos** (Grecia, 310-230 a. C.). En este modelo la Tierra, al igual que los demás planetas, poseían un movimiento de traslación alrededor del Sol y la Luna a su vez, giraba alrededor de la Tierra. Además defendió que la Tierra giraba sobre sí misma cada 24 h y tardaba un año en dar la vuelta a la Sol. Sin embargo, sus teorías encontraron una oposición insalvable entre los filósofos griegos y nunca fueron aceptadas.

La mayor parte de los escritos de los primeros científicos griegos se perdieron con el incendio de la biblioteca de Alejandría y su conocimiento se desvaneció. Solo una pequeña parte llegó a occidente a través de la cultura árabe.

Durante toda la Edad Media se mantuvo la hipótesis geocéntrica, ya que fue muy bien aceptada por los poderes eclesiásticos, pues era coherente que las criaturas creadas por Dios habitaran el planeta Tierra situado en el centro del Universo. Y lo que no era más que un instrumento matemático se convirtió en dogma de fe. Otras hipótesis fueron consideradas herejías y sus autores condenados a la hoguera.

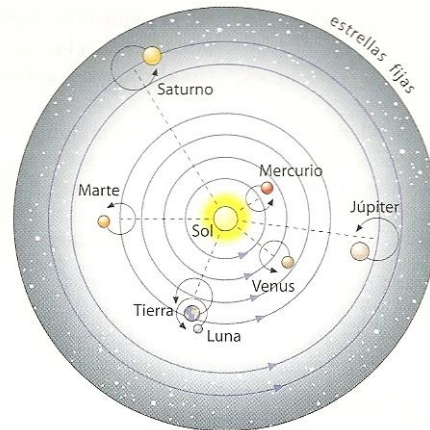
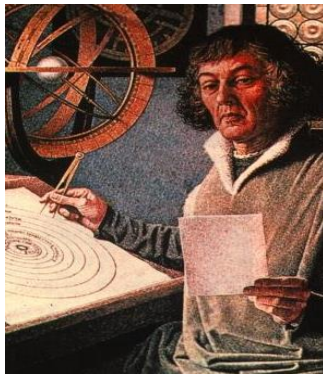
Un manto de oscuridad e ignorancia se extendió por el mundo, y las ideas de muchos hombres y mujeres ilustres fueron pisoteadas y dejadas de lado, dando paso a modelos absurdos e inconsistentes, pero acordes con las Sagradas Escrituras.

Nicolás Copérnico (Polonia, 1473-1543), astrónomo polaco, recopiló sus observaciones en la obra *Sobre las revoluciones de las esferas celestes*. En ella, Copérnico postuló que la Tierra giraba alrededor de su eje y realizaba una vuelta diaria.

Basándose en esta hipótesis, descubrió que las complejas órbitas descritas por Tolomeo podían simplificarse si se elegía el Sol, y no la Tierra, como centro del universo. Es decir, eran la Tierra y el resto de los planetas los que giraban alrededor del Sol.

Sin embargo, aunque el modelo de Copérnico era más simple y sistemático que el de Ptolomeo, seguía considerando que los planetas describían órbitas circulares y que existían los epiciclos.

Por temor a las represalias eclesiásticas Copérnico mantuvo en secreto su descubrimiento y solo lo publicó al final de su vida.

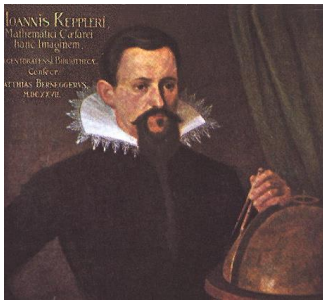


Modelo de Copérnico

Giordano Bruno (Italia, 1548-1600) fue uno de los primeros en aceptar y difundir el modelo heliocéntrico de Copérnico. Siguiendo la lógica de que deberían existir infinitud de Mundos, también propuso que debía existir vida en otras partes del Universo. Estas ideas, contrarias a la Iglesia, le costaron la vida: fue quemado en la hoguera, después de estar encarcelado durante 8 años.

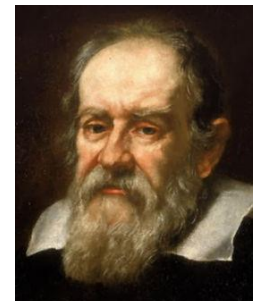
En 1610, **Johannes Kepler** (Alemania, 1571-1630) utilizó los exhaustivos datos de Tycho Brahe y adaptó la teoría de Copérnico a un sistema planetario con órbitas elípticas.

Descartó la antigua creencia del movimiento uniforme y supuso que la velocidad de los planetas es mayor o menor según su distancia al Sol. Sus teorías, válidas para cualquier objeto en órbita alrededor de una estrella cualquiera, quedan establecidas en las *tres leyes del movimiento planetario* o leyes de Kepler. Pero de nuevo, el conocimiento científico tropezó con el fanatismo religioso y la obra de Kepler también fue prohibida por la Iglesia.



Galileo Galilei (Italia, 1564-1642) descubrió las fases de Venus con un telescopio que construyó en 1610, demostrando que giraba alrededor del Sol y que la teoría de Copérnico era cierta. También descubrió cuatro de los satélites de Júpiter (llamados, desde entonces, satélites galileanos). Asimismo, estudió las manchas solares y la Vía Láctea. En 1632 se publicó su obra *Diálogo sobre los dos grandes sistemas del mundo*, en la que defendía la teoría de Copérnico.

La reacción de la Iglesia fue, otra vez, inmediata y Galileo fue obligado a retractarse.



A partir de los descubrimientos realizados por Copérnico, Galileo y Kepler, **Isaac Newton** (Inglaterra, 1643-1727) escribió su obra *Principios matemáticos de filosofía natural* (1687). En ella formulaba su **teoría de la gravitación universal**, un conjunto de leyes científicas que explicaban el movimiento de los cuerpos celestes, la caída y el peso de los cuerpos, el movimiento de los satélites, el movimiento y la periodicidad de las mareas y la trayectoria de los cometas.

A partir de ese momento el modelo heliocéntrico fue universalmente aceptado.

2.2. LOS MODERNOS MODELOS DEL UNIVERSO

La **astronomía** es la ciencia que estudia los componentes del Universo (astros) a partir de la información que nos da la radiación electromagnética que llega de ellos: luz visible, infrarroja, ultravioleta, rayos X, etc.

- La **cosmología** es una parte de la astronomía que estudia la estructura, el origen y el desarrollo de la totalidad del Universo, el cosmos.
- La **astrofísica** es una parte de la astronomía que aplica las leyes de la física para estudiar la composición, la estructura y la evolución de los astros.

La cosmología describe el Universo de forma idealizada mediante la aplicación de **modelos matemáticos**. Todos los modelos son versiones simplificadas de objetos o fenómenos que se desea describir con el fin de facilitar su comprensión. Las ecuaciones matemáticas, permiten a los cosmólogos teorizar sobre la naturaleza del Universo antes de que la observación experimental confirme o niegue sus suposiciones.

a) Modelo del Universo estático e infinito

A comienzos del siglo XX el modelo cosmológico aceptado era el modelo del **Universo estático**, eterno e infinito, que ha existido siempre y siempre existirá, es decir, no tiene comienzo ni fin.

En 1917, **Albert Einstein** (Alemania, 1879-1955) expuso su **teoría de la relatividad general**, que proporcionó la descripción matemática más completa del Universo hasta entonces. En su teoría, Einstein:

- Establece la equivalencia entre **masa** (m) y **energía** (E). Es decir la una se puede convertir en la otra si se alcanza la velocidad de la luz (c) al cuadrado. ($E = m \cdot c^2$)
- Unifica los conceptos de **espacio** y **tiempo**. Así, la gravedad no es más que la deformación que provoca en el continuo espacio-tiempo la masa de los cuerpos celestes.

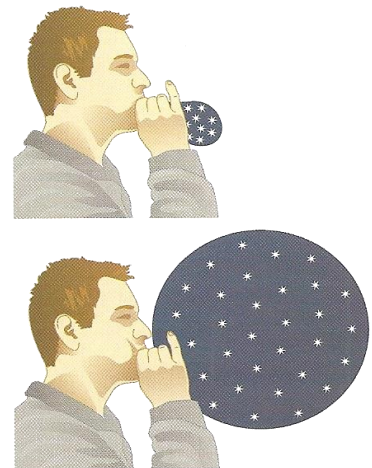
Sus ecuaciones predecían un modelo de Universo en expansión, pero la idea que tenía el propio Einstein de un cosmos eterno e inmóvil era tan fuerte que introdujo en ellas un factor (la **constante cosmológica**) para obligar a su modelo a permanecer estático.

b) Modelo del Universo dinámico y finito: el Big Bang

En 1929, Edwin Hubble (Estados Unidos, 1889-1953) demostró experimentalmente que las galaxias se alejan unas de otras y que el **Universo está en expansión**.

Basándose en ello, **Georges Henry Lemaître** (Bélgica, 1894-1966) propuso la idea de que si el universo se expande, eso quiere decir que hubo un momento inicial en el que todas las galaxias estaban juntas en un punto de densidad infinita que explotó. Por tanto, el Universo tuvo un origen.

El modelo cosmológico del **Big Bang** o Gran Explosión, con el que están de acuerdo la mayoría de los cosmólogos actuales, propone que el Universo es dinámico y finito y se creó en una explosión a partir de un punto inmaterial infinitamente denso y caliente, hace unos 13.700 millones de años, y desde entonces no ha cesado de expandirse impulsado por una energía enigmática e invisible (**energía oscura**).



Las galaxias pueden imaginarse como puntos pintados en un globo. Si lo hinchamos, la distancia entre todos los puntos irá aumentando pero ninguno de ellos es el origen de la expansión.

c) Modelo del Universo dinámico e infinito: el estado estacionario

El nombre de *Big Bang* fue empleado peyorativamente por **Fred Hoyle** (Inglaterra, 1915-2001) para referirse a la hipótesis de Lemaître.

Hoyle propuso en 1948, junto con Thomas Gold y Herman Bondi, otro modelo alternativo: el modelo cosmológico del **estado estacionario**. Este admite la expansión, pero concibe un Universo infinito, que no tiene un principio definido, en el que se genera materia continuamente mediante mecanismos desconocidos.

2.3. PRUEBAS DEL BIG BANG

a) El desplazamiento hacia el rojo.

Durante mucho tiempo los astrónomos habían creído que nuestra galaxia, la Vía Láctea, era todo el Universo. En 1924 **Edwin Hubble** descubrió que lo que se suponía que eran nebulosas lejanas, en realidad eran galaxias similares a la nuestra. Este gran astrónomo hizo, en 1929, otro genial hallazgo: midió las distancias a la Tierra de varias galaxias y comprobó que se alejan unas de otras; es decir, el Universo se expande.

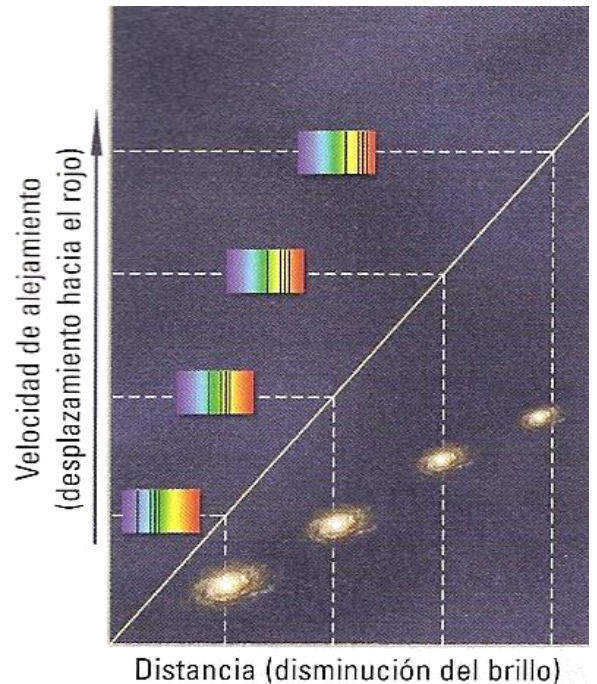
La **ley de Hubble** establece que la velocidad de alejamiento de una galaxia es directamente proporcional a su distancia.

$$v = H_0 \cdot D$$

v es la velocidad de alejamiento de una galaxia (en km/s)

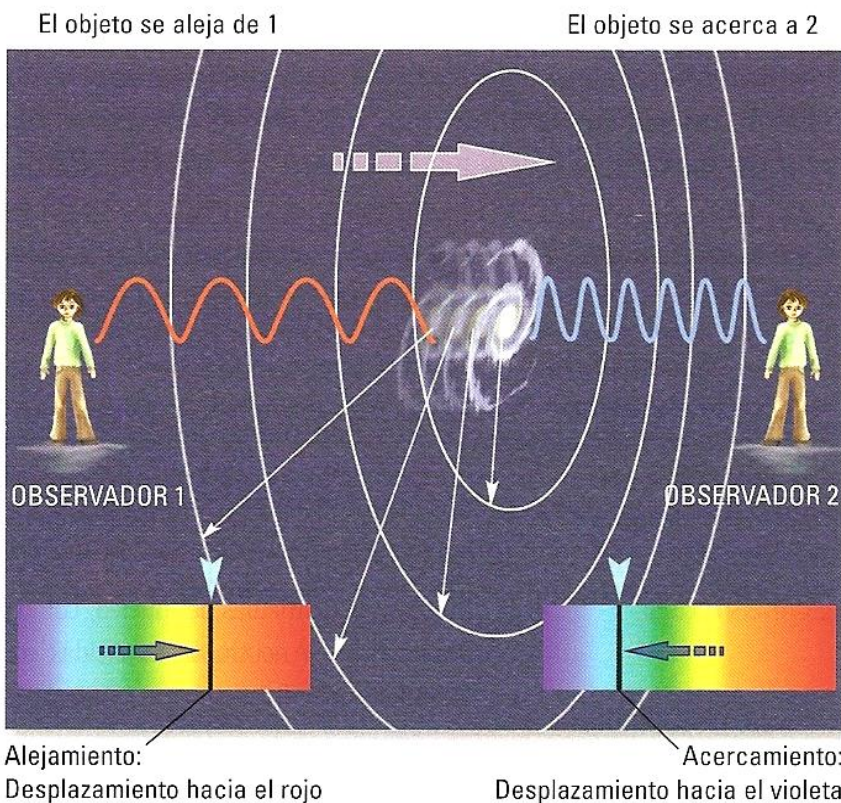
D es la distancia entre la galaxia y la Tierra (en megaparsec: Mpc)

H₀ es la constante de proporcionalidad de Hubble (su cálculo en 2006 se estimó en 70 Km/s/Mpc).



La luz que llega a la Tierra desde las estrellas situadas en las galaxias contiene una mezcla radiaciones de distintas longitudes de onda, que pueden separarse mediante un **espectroscopio** y dan lugar a un espectro

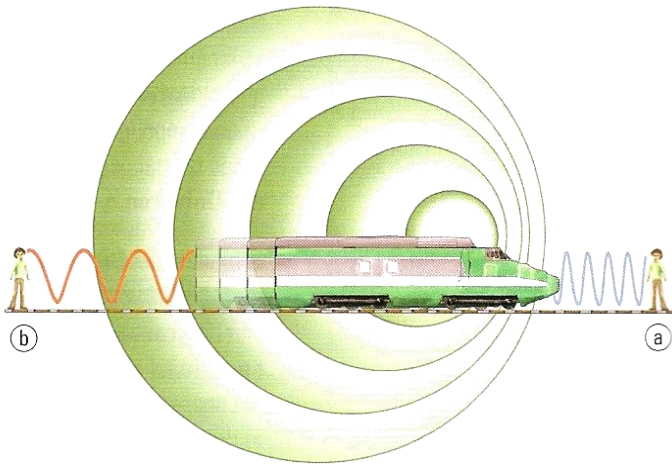
Cada espectro está formado por los siete colores del arco iris (la luz roja es la de mayor longitud de onda y la luz violeta, la de menor), y sobre ellos se superponen una serie de bandas oscuras de absorción correspondientes a la presencia de determinados elementos químicos presentes en el gas interestelar de la galaxia, que absorben parte de la radiación.



Estos espectros se asemejan a los códigos de barras. Cada elemento químico tiene el suyo propio: la posición, es decir, la longitud de onda en que aparecen las bandas de absorción, es una constante característica de cada elemento químico.

Edwin Hubble midió la posición de las bandas espectrales de absorción de determinados elementos químicos presentes en varias galaxias situadas a diferentes distancias de la Tierra y los comparó con los que se obtienen en el laboratorio para los mismos elementos. Descubrió que las bandas de absorción experimentaban desplazamientos hacia longitudes de onda mayores (hacia el rojo) que eran más acusados cuanto más alejadas estaban las galaxias.

Este fenómeno, conocido como **desplazamiento hacia el rojo** de las líneas espectrales, se debe al **efecto Doppler** y significa que las galaxias se alejan unas de otras.



El físico alemán Johann Christian Doppler descubrió que cuando una onda es emitida por un objeto en movimiento, la longitud de onda percibida por un observador es diferente a la emitida por el objeto: es mayor si el objeto emisor se aleja, y menor si se acerca. Se puede observar fácilmente en las ondas sonoras que emite el silbato de un tren en movimiento: es más agudo cuando se acerca al observador (piiiiiii ...) (a) y más grave cuando se aleja (paaaaaaaaa...) (b). Esto se explica así: el tren que se aproxima comprime las ondas sonoras delante de él, lo que provoca el acortamiento de su longitud de onda (sonido agudo); mientras que el tren al alejarse produce el efecto contrario y las ondas se alargan (sonido grave).

b) La radiación cósmica de fondo

La confirmación definitiva de la teoría del Big Bang fue el descubrimiento de la *radiación cósmica de fondo* o *fondo de microondas*.

Trabajando con un nuevo tipo de antena comercial, **Arno Penzias** y **Robert Wilson**, descubrieron en 1964 una radiación muy débil que parecía proceder de todos los puntos del Universo. La interpretación que se dio a este hallazgo era que esta radiación era ni más ni menos el "eco" del Big Bang.

La expansión del Universo provocó el enfriamiento de los fotones (radiación luminosa) hasta -270°C . Esto provocó a su vez, la disminución de la intensidad de la radiación y, por tanto, el aumento de su longitud de onda hasta la frecuencia de las microondas.

Las observaciones coincidían con los cálculos teóricos de otros físicos (**Gamow**, **Dicke** y **Peebles**). Si la Teoría del Big Bang era cierta, debía existir una radiación residual del momento de la gran explosión que sería muy débil, estaría situada en la región de las microondas y correspondería a una temperatura de unos -300°C .

La existencia de la radiación cósmica de fondo fue confirmada en 1992 por el COBE (Cosmic Background Explorer), un satélite artificial destinado a medir dicha radiación. El análisis de los datos obtenidos concuerda con lo predicho. La temperatura de la radiación de fondo es de $2,73\text{ K}$ ($-271,27^{\circ}\text{C}$) y se extiende de forma isótropa (igual en todas direcciones) en el universo. Posteriormente los datos fueron corroborados por la sonda WMAP.

Igual que un trueno retumba antes de pagarse del todo, el eco de la explosión de la que surgió nuestro Universo había llegado hasta el presente.

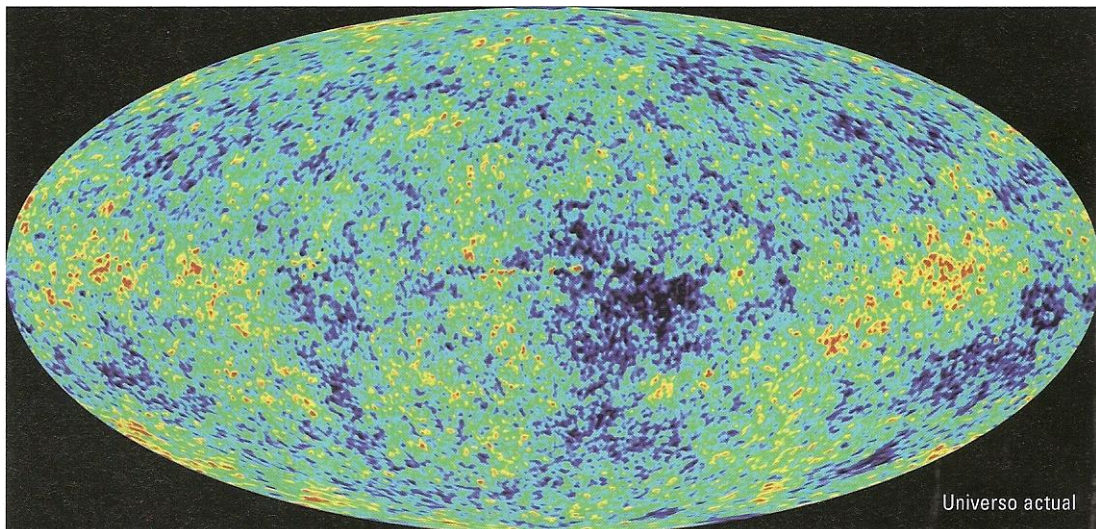


Imagen del Universo proporcionada por la sonda WMAP.

2.4. LA TEORÍA DEL BIG BANG

El fenómeno del desplazamiento hacia el rojo señala un hecho de suma importancia, pues implica que el **Universo se expande**. Si el movimiento de alejamiento de las galaxias se invirtiese durante un tiempo igual a la edad del Universo, se llegaría a la conclusión de que todas las galaxias se encontraban en un mismo punto en el mismo instante del pasado, que marcaría el **origen del Universo**.

El modelo del **Big Bang** deduce, a partir del actual ritmo de expansión, que en el instante $t = 0$ toda la **materia** del Universo, las cuatro **fuerzas** que actúan sobre ella (la **gravedad**, la fuerza **electromagnética**, la fuerza **nuclear fuerte** y la **nuclear débil**) y la **energía**, es decir, los componentes fundamentales de todo cuanto conocemos, se encontraban bajo la forma de una **singularidad**: un punto inmaterial infinitamente denso y caliente, de radio nulo, en unas condiciones tan extremas que la física actual aún no sabe describir con exactitud.

Hace 13.700 millones de años en medio de la **nada** más absoluta, la singularidad explotó (**Big Bang**). En ese mismo instante, nacieron el **espacio** y el **tiempo**. A partir de este momento se formó el **Universo** que, desde entonces, no ha cesado de expandirse, enfriándose cada vez más y más.

La **cosmología** moderna ha reconstruido la **historia cósmica** dividiéndola en nueve grandes eras:

a) Era de Planck: el primer instante

A la **era de Planck**, hasta los 10^{-43} segundos después del Big Bang, se le ha llamado «la frontera de la física», porque hasta el momento no existe ninguna teoría que permita describir con exactitud las características y las propiedades de este instante fugaz.

Para ello sería necesario unificar la **teoría de la relatividad general**, que nos permite comprender la fuerza de la gravedad y el mundo de las cosas grandes (el espacio-tiempo, las galaxias, etc.) con la **teoría de la mecánica cuántica**, que nos explica el mundo de las cosas pequeñas (el átomo, las partículas elementales que lo componen y las fuerzas que intervienen).

La explicación física que permita la comprensión de ambos mundos debería ser la misma, pero la dificultad surge cuando se utiliza el lenguaje físico de las cosas grandes (teoría de la relatividad general) para explicar las cosas pequeñas (la teoría de la mecánica cuántica).

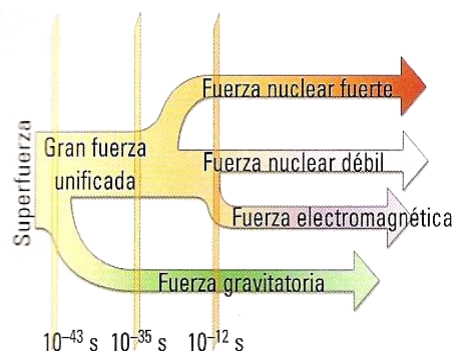
El **modelo estándar** es una teoría basada en la mecánica cuántica que describe a la perfección a las partículas elementales (quarks, leptones...) y a tres de las fuerzas fundamentales que actúan sobre ellas (nuclear fuerte, nuclear débil y electromagnetismo), pero que no es capaz de explicar los fenómenos a gran escala ni la fuerza de la gravedad.

La **teoría cuántica de la gravitación**, aún sin elaborar, es objeto de investigación en la actualidad. Solo algunas teorías de gran complejidad matemática, como la **teoría de cuerdas** o la **teoría M**, tratan de interpretar los sucesos ocurridos en los instantes posteriores (y previos) al gran estallido.

Se supone que en la **era de Planck** la temperatura y la densidad eran tan altas que las **cuatro fuerzas** que rigen el comportamiento de todas las partículas elementales estaban agrupadas en una única superfuerza, y toda la **materia** se hallaba bajo la forma de la **energía**.

b) Era de la gran unificación

Entre 10^{-43} y los 10^{-35} segundos se separó la **fuerza de la gravedad** de las tres fuerzas restantes, que permanecían unidas bajo la forma de la **gran fuerza unificada**.



c) Era de la inflación

A partir de los 10^{-35} segundos, la expansión del espacio-tiempo y el enfriamiento permitieron la separación de la **fuerza nuclear fuerte** permaneciendo unidas las dos restantes (**nuclear débil** y **electromagnética**). Esta separación desprendió una inmensa cantidad de energía que provocó una etapa de inflación en la que el Universo, en un instante minúsculo, incrementó su tamaño 10^{50} veces.

Según la **teoría de la inflación**, propuesta por Allan Guth en 1981, el crecimiento desmesurado e instantáneo fue la causa de que unas regiones crecieran algo más rápidamente que otras. Estas **fluctuaciones** provocaron la aparición de **irregularidades** o «**arrugas**» en el cosmos, debidas a leves diferencias de temperatura y densidad entre unas zonas y otras, que dieron lugar al «**alisamiento**» del espacio y fueron el germen de las futuras **galaxias** y de la estructura del Universo.

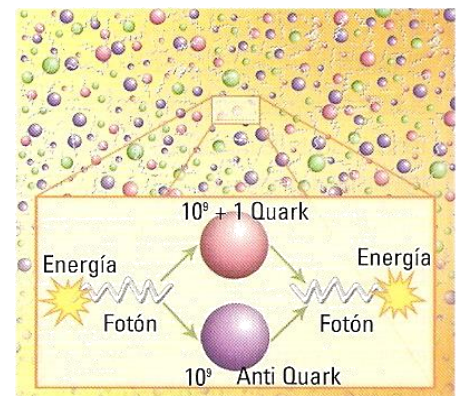
d) Era electrodébil: la energía se convierte en materia

Antes de la inflación, el Universo se encontraba en estado de vacío, pero cuando las **fuerzas** comenzaron a separarse, experimentó una especie de cristalización que liberó enormes cantidades de **energía** (radiación fotónica). En este instante frenético, la gigantesca fuente de energía liberada se transformó en una poderosa máquina capaz de **materializar la energía** y forjar una gran variedad de **partículas**.

Según la ecuación de Einstein, **energía** y **materia** son equivalentes ($E=m \cdot c^2$) y esto es lo que sucedió cuando apenas había transcurrido 10^{-32} segundos y el Universo tenía una temperatura de 10^{27} K: los **fotones** se transformaban en materia y daban lugar a pares de partículas de **materia** y **antimateria** (**quarks** y los **antiquarks**).

En este horno cósmico de temperaturas extremas, el Universo era una especie de sopa densa donde los **quarks** colisionaban con los **antiquarks** para volver a convertirse en **fotones** (energía), de manera que existía un equilibrio entre materia y radiación. Este estado de equilibrio no duró mucho tiempo, pues conforme continuaba la expansión del Universo, la temperatura disminuyó y la energía de la radiación ya no era suficiente para la formación de materia.

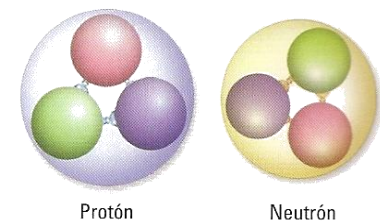
Sin embargo, las colisiones materia-antimateria continuaban ocurriendo con la consiguiente aniquilación de las partículas y la generación de fotones (energía radiante). Pero por alguna razón que desconocemos, por cada **mil millones de antiquarks** que surgieron aparecieron **mil millones de quarks más uno**. Esta asimetría de las leyes físicas, que ha sido comprobada sucesivas veces en los colisionadores experimentales de partículas, permitió que durante el enfriamiento siguiente todos los **quarks** desaparecieran por aniquilación con sus **antiquarks** (convirtiéndose de nuevo en energía) con excepción de **uno entre mil millones**.



La ligerísima preferencia por la materia respecto a la antimateria es la causa de que vivamos en un Universo de materia, y confirma el hecho de que la antimateria apenas exista.

e) Era hadrónica

A los 10^{-6} segundos del Big Bang, el Universo se había enfriado lo suficiente como para que la fuerza nuclear fuerte actuase sobre los quarks, como un potente pegamento, y permitiera la aparición de asociaciones estables de los mismos, que dieron lugar a la formación de **hadrones** (protones y neutrones), y otras partículas como los **mesones**, además de sus correspondientes antipartículas.



Los protones y los neutrones están formados por tres quarks.

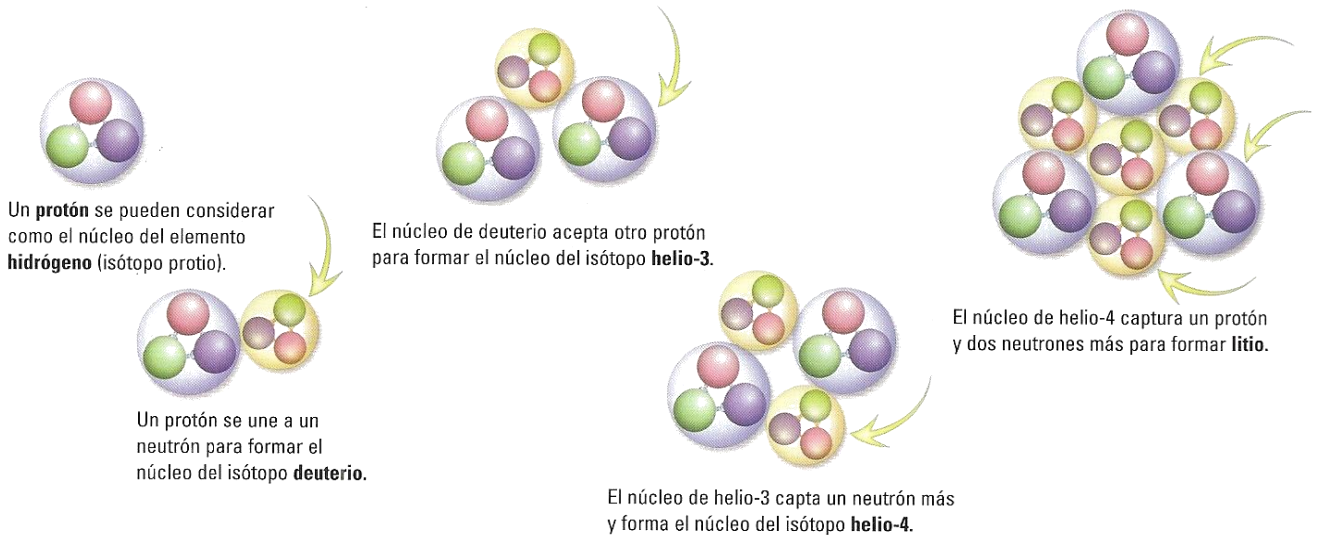
f) Era leptónica

A los 10^{-3} segundos del Big Bang, la temperatura ya no permitía formar más quarks, pero todavía tenía la temperatura suficiente para que la **energía** de la radiación fotónica se materializase en partículas de menor masa: **leptones** (y antileptones). Pero llegó un momento en el que la expansión y la consiguiente disminución de la temperatura ya no permitían, la generación de más pares de materia y antimateria.

Al final de la era leptónica toda la **antimateria** había desaparecido, y su aniquilación produjo una enorme cantidad de **energía radiante** en forma de fotones, de forma que hoy día el Universo contiene mil millones de veces más fotones que todas las partículas de materia juntas. Estos fotones son los restos de toda la antimateria primordial.

g) Era de la nucleosíntesis

Cuando el Universo tenía un segundo de edad, la temperatura alcanzó un valor suficientemente bajo como para permitir la unión entre **protones** y **neutrones** y, en apenas tres minutos, se formaron **núcleos atómicos** de hidrógeno, helio y pequeñas cantidades de litio, los tres elementos más simples del sistema periódico.

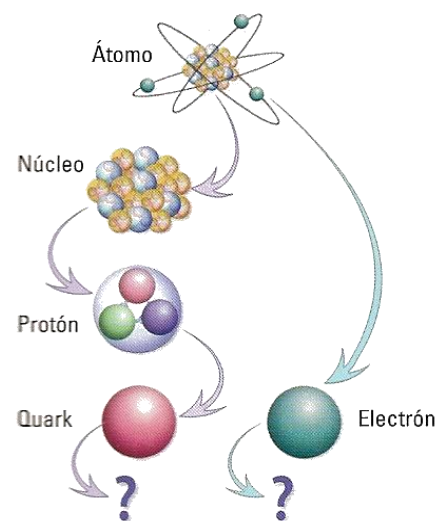


h) Era de los átomos y de la radiación

En el período comprendido entre 1 segundo y 300.000 años después del Big Bang, toda la materia se encontraba suspendida en un océano de luz y formaba un **plasma**: un estado en que los núcleos de los átomos, debido a las enormes temperaturas, están disociados en sus electrones y la intensa radiación luminosa constituida por los fotones procedentes de la desintegración de la antimateria no puede escapar.

Unos 300.000 años después del Big Bang, la temperatura había bajado hasta 2.700 °C, lo bastante como para permitir que la **fuerza electromagnética** actuase e hiciese posible la asociación estable entre los núcleos (carga positiva de los protones) y los electrones (carga negativa), apareciendo así los **primeros átomos** de hidrógeno, helio y litio.

Cuando los electrones libres del plasma se combinaron con los núcleos para formar átomos, dejaron de interactuar con los fotones, el Universo se volvió entonces transparente y permitió que la enorme cantidad de radiación luminosa pasara a través de la materia atómica sin obstáculos.

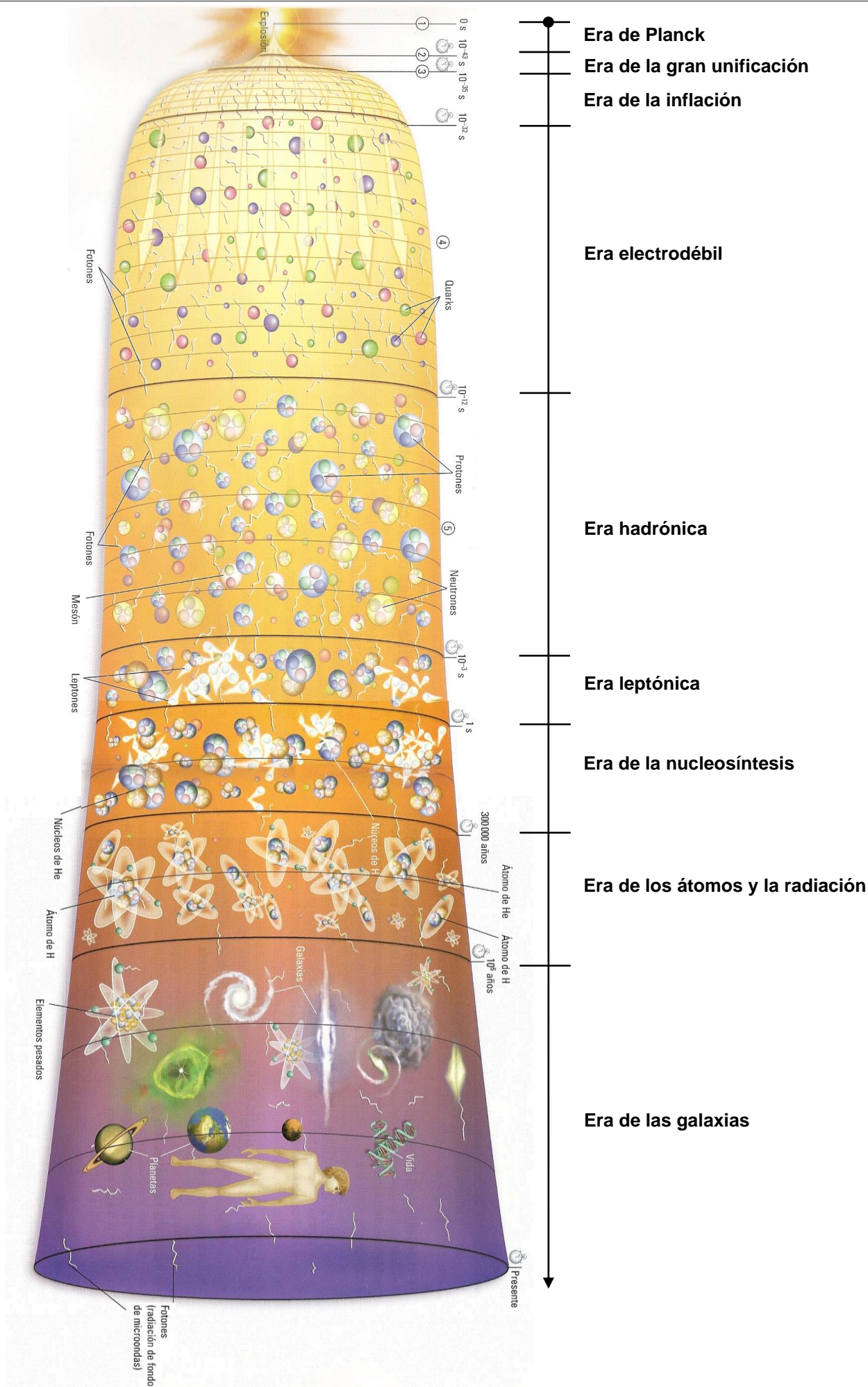


i) Era de las galaxias

Comenzó cuando el Universo tenía un millón de años y se extiende hasta el momento actual. El Universo se hizo transparente a la radiación en el momento en que la materia se organizó en **átomos** de hidrógeno, helio y litio, que formaron una inmensa **nebulosa primordial** a partir de la cual se formaron las **galaxias**.

Posiblemente, la **fuerza de la gravedad** actuó sobre las irregularidades iniciales en la densidad y temperatura de la materia, generadas durante la **inflación** del Universo, haciendo que la materia de esta nebulosa primordial se desgajara en forma de filamentos y grumos.

Estas formaciones fueron el origen de estructuras a gran escala: las **galaxias** se reúnen en **cúmulos**, estos en **supercúmulos** y estos en **filamentos** que le dan a nuestro Universo un aspecto esponjoso. Los racimos de galaxias se disponen en las paredes de las burbujas dejando entre ellas vacíos inmensos.

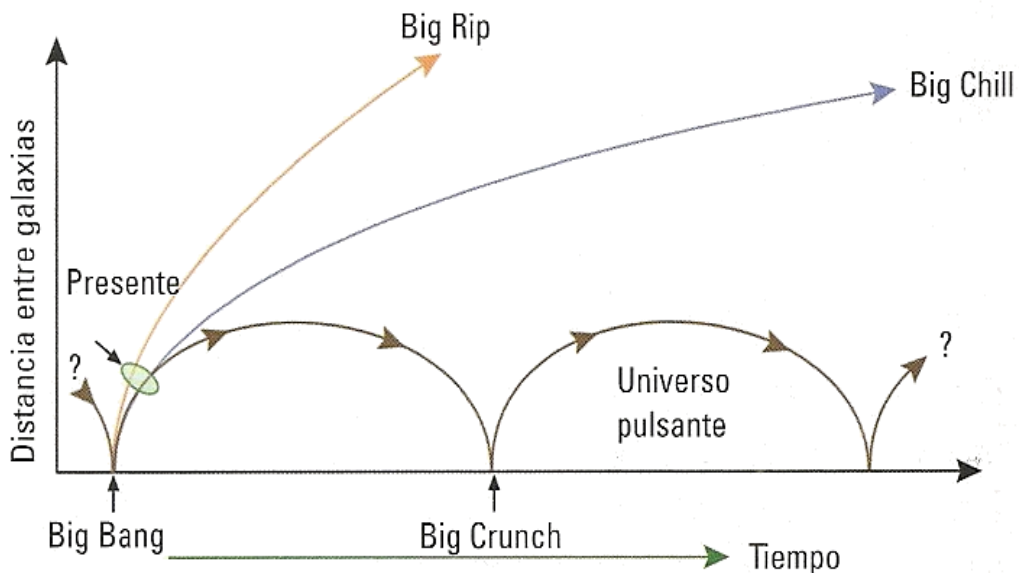


2.5. EL FUTURO DEL UNIVERSO

Hasta hace poco tiempo, los cosmólogos creían que el futuro del Universo dependía únicamente de la densidad de su masa-energía y admitían dos posibles destinos: el **Big Chill** y el **Big Crunch**.

Pero el descubrimiento reciente de la **energía oscura**, responsable de la aceleración de la expansión, ha planteado otro escenario posible para el destino futuro del Universo: el **Big Rip**.

- **Big Chill (el gran enfriamiento).** Un Universo abierto donde la materia-energía es insuficiente y no se alcanza la densidad crítica necesaria para que la fuerza de la gravedad frene la expansión. En un Universo de estas características el espacio se expandiría indefinidamente, aunque a un ritmo lento frenado por la gravedad: todo el contenido del Universo estaría condenado a una muerte lenta y fría en medio de la oscuridad más absoluta
- **Big Crunch (la gran contracción).** Un Universo cerrado donde la cantidad de materia-energía resulta suficiente para superar la densidad crítica y genere una atracción gravitatoria tan fuerte que frene la expansión y dé comienzo al proceso inverso, la Gran Contracción, hasta alcanzar el punto de singularidad inicial. Otra posibilidad sería el Universo «pulsante» sometido a infinitos ciclos de expansión-compresión.
- **Big Rip (el gran desgarramiento).** Un Universo próximo a la densidad crítica, pero donde la fuerza repulsiva de la energía oscura superaría a la fuerza de la gravedad. Esto provocaría una expansión tan acelerada que en un instante determinado, el Universo volaría en pedazos y se produciría el desgarramiento de todo cuanto conocemos: las galaxias y toda la materia se evaporarían y el tiempo se detendría.



3. COMPONENTES DEL UNIVERSO

3.1. GALAXIAS

Las **galaxias** son enormes acumulaciones de materia en forma de **polvo cósmico, nebulosas y estrellas**, algunas de las cuales poseen sistemas planetarios.

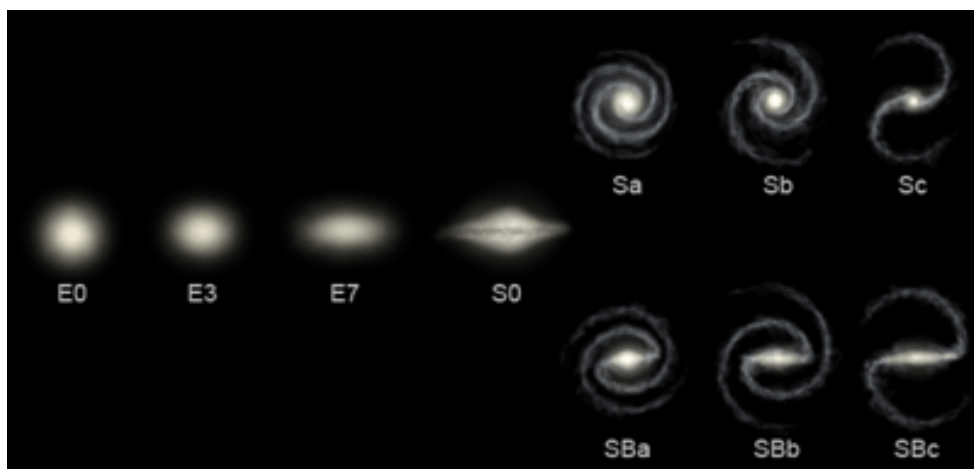
Todos estos componentes galácticos se mantienen unidos entre sí y giran alrededor del centro galáctico (agujero negro) por la gravedad. En las galaxias, el espacio entre las estrellas no está vacío, ya que contiene el **medio interestelar** formado por una mezcla de gases (hidrógeno y helio principalmente) y polvo cósmico.

Se calcula que en el universo observable o visible (esfera situada a nuestro alrededor de 13.000 millones de años luz de diámetro) existen unos cien mil millones de galaxias (10^{11}).



El primero que realizó una clasificación de las galaxias fue E. Hubble. Según su esquema las galaxias se clasifican en:

- **Elípticas.** Tienen forma de elipse y están poco estructuradas. Están formadas por estrellas viejas y tienen poca materia interestelar. Pueden llegar a tener tamaños enormes y su origen parece ser la colisión y fusión de galaxias preexistentes. Se nombran con la letra E y un número del 0 al 7 (excentricidad). Las E0 son prácticamente esféricas y la E7 muy aplanada.
- **Lenticulares.** Nombradas como S0. Tienen forma de disco, similares a las espirales pero sin brazos.
- **Espirales.** Son discos rotantes de estrellas y materia interestelar. En ellas se distingue una zona central protuberante formada por estrellas viejas y un número variable de brazos formados por estrellas jóvenes. Se usa la letra S y una letra a, b, c que indica si los brazos están muy pegados al núcleo (Sa) o muy separados de éste (Sc)
- **Espirales barradas.** (SB) Parecidas a las espirales pero se puede apreciar una barra que conecta diametralmente el núcleo con los brazos. Se clasifican entre SBa (barra central larga) y SBc (barra corta).



Clasificación de las galaxias según Hubble

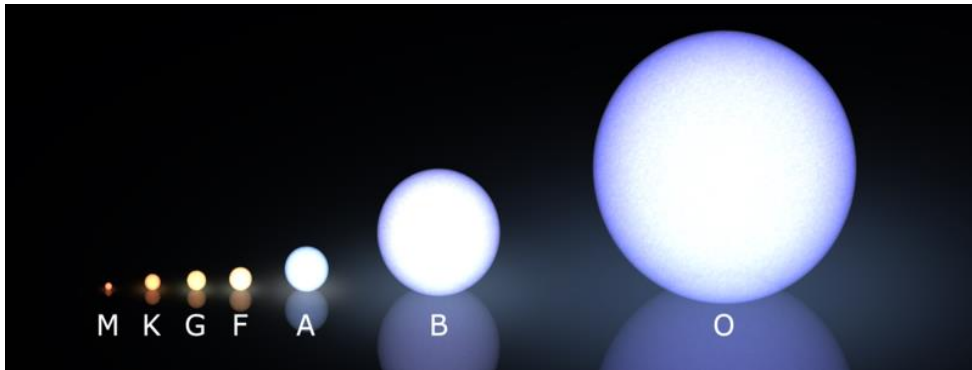
Además de éstos existe un quinto grupo, el de las galaxias **irregulares (I)**, sin forma definida y aspecto caótico. Están formadas por estrellas jóvenes y mucho polvo y gas interestelar. Parecen ser el resultado de explosiones de estrellas y formación posterior de otras.

3.2. ESTRELLAS

Las **estrellas** son enormes esferas gaseosas de hidrógeno y helio. Estos gases están tan calientes y alcanzan temperaturas tan elevadas que convierten el interior de las estrellas en una gigantesca bomba de fusión termonuclear. En esta reacción dos átomos de hidrógeno se unen para formar uno de helio y se emite gran cantidad de energía radiante.

La mayoría de las estrellas se encuentran muy cerca de otra (**sistemas binarios**) o formando grupos más o menos cerrados (**cúmulos estelares**). Las estrellas solitarias, como el Sol son muy escasas.

Existen varias formas de clasificar las estrellas. Una de ellas se basa en su **tipo espectral**. Según este criterio las estrellas se clasifican en las siguientes clases ⁽¹⁾



La clase espectral está muy relacionada con el color, la temperatura y el tamaño de la estrella:

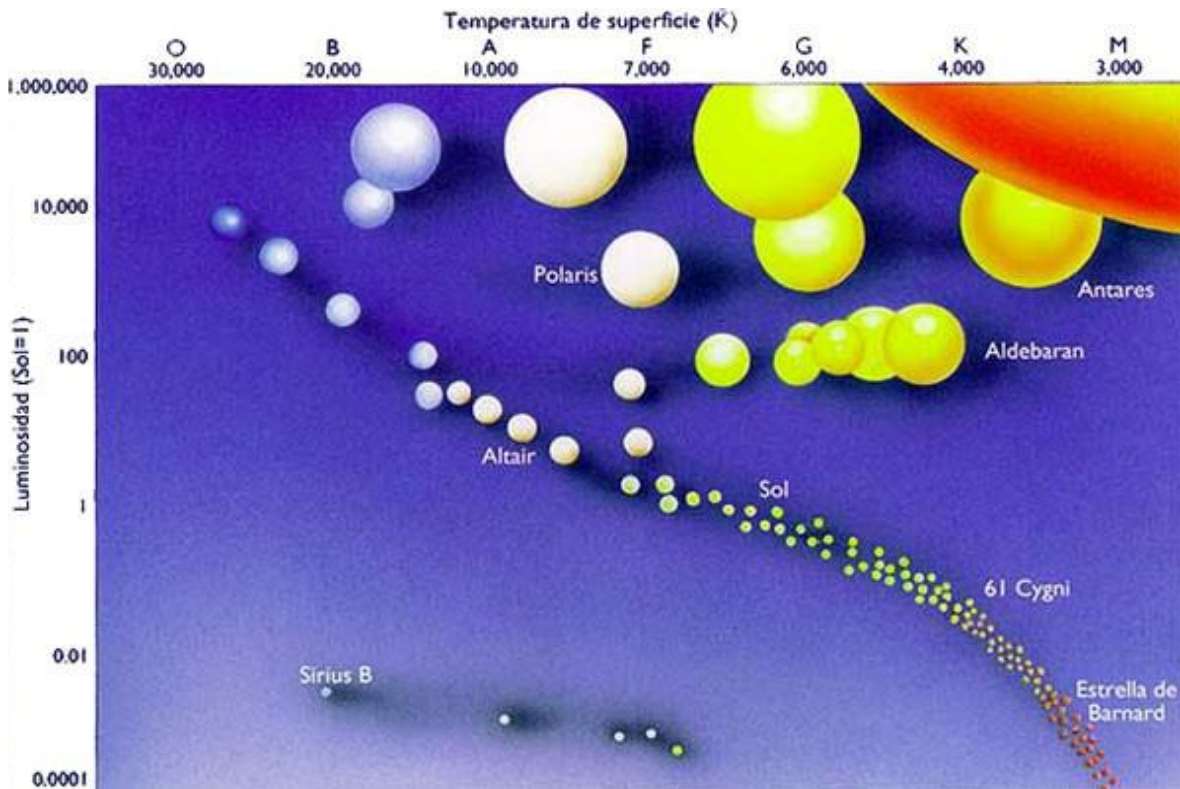
Clase	Temperatura (°C)	Color	Masa (M/M _{sol})	Radio (R/R _{sol})
O	50.000 – 28.000	Azul	60	15
B	28.000 - 9600	Blanco azulado	18	7
A	9600 - 7100	Blanco	3,1	2,1
F	7100 - 5700	Blanco amarillento	1,7	1,3
G	5700 - 4600	Amarillo	1,0	1,0
K	4600 - 3200	Amarillo anaranjado	0,8	0,9
M	3200 - 1700	Rojo	0,3	0,4

Otra manera de clasificar las estrellas es según su **magnitud**. Las estrellas más tenues que pueden distinguirse a simple vista son de magnitud 6 y cuanto más brillante es la estrella menor es su magnitud. La estrella Polar, por ejemplo, es de magnitud 2 y Sirio (la más brillante del cielo tiene una magnitud de -1,4 (negativa). El Sol según esta clasificación tiene una magnitud aparente de -26,8.

La magnitud que se ve a simple vista es la **magnitud aparente** y es engañosa. Podemos apreciar una estrella como muy brillante no porque realmente lo sea, sino porque está cerca (el brillo es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia). Por eso los astrónomos definen la **magnitud absoluta** que indica el brillo intrínseco o luminosidad de la estrella. Es decir, es la magnitud que tendría la estrella si la colocásemos a un parsec de distancia.

- **Magnitud absoluta** es la cantidad total de energía contenida en la radiación emitida por la estrella
- **Tipo espectral** indica la forma en que esta energía se distribuye en longitud de onda.

⁽¹⁾ La regla nemotécnica para recordarlas consiste en retener la frase *Oh, Be A Fine Girl, Kiss Me* (Oh, sé una buena chica, bésame)

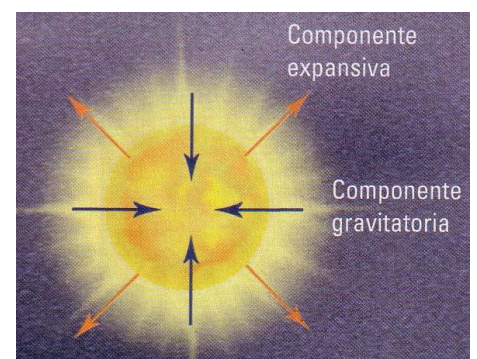


La representación gráfica en un plano de estos dos parámetros recibe el nombre de diagrama de Hertzsprung-Russell, o diagrama HR. Como se puede observar en la figura, el diagrama HR muestra una forma curiosa, distribuyéndose la gran mayoría de estrellas en una región llamada **Secuencia Principal**

El diagrama HR se interpreta como un resultado de la evolución de las estrellas. La existencia de la secuencia principal se debe entonces al hecho de que nosotros observamos en las estrellas aquellos estados en los que pasan la mayor parte de su “vida”. Como veremos a continuación, a lo largo de la vida de una estrella, ésta se va desplazando por el diagrama HR en función de su masa.

El nacimiento, vida y muerte de una estrella están condicionados por dos efectos contrapuestos:

- Por un lado la **fuerza de gravedad** hace que la estrella, una vez que ha alcanzado cierta masa, se contraiga. La energía gravitatoria liberada en el proceso hace que la materia se caliente hasta que en su núcleo se alcance una temperatura tal que comiencen la reacción de fusión del hidrógeno para dar helio.
- Una vez que la fusión se ha iniciado en el núcleo, la energía liberada y las partículas (electrones, neutrinos) resultantes ejercen una presión (**presión de radiación**) que tiende a expandir la estrella.



Cuando ambas presiones se equilibran la estrella entra en un periodo de estabilidad que dura aproximadamente el 90 % de su vida (**secuencia principal**).

La estrella permanecerá en la secuencia principal mientras tenga hidrógeno que quemar. Pero, inevitablemente, llega un tiempo en que el combustible (hidrógeno) se agota.

- Las estrellas cuya masa se sitúa alrededor del 1% de la masa del Sol (estrellas enanas) queman su combustible lentamente, pudiendo permanecer en la secuencia principal billones de años.
- Las que tienen una masa similar al Sol lo consumen mucho más rápidamente (4,5 millones de toneladas por segundo) y lo agotan en sólo unos miles de años, 10.000 millones de años en el caso del Sol.
- En el extremo opuesto las estrellas gigantes (60 veces la masa del Sol) consumen el hidrógeno muy rápidamente y sólo están en la secuencia principal pocos millones de años (entre 1 y 100).

La evolución de la vida de las estrellas depende, por tanto, de su masa:

a) En las estrellas del tamaño del Sol

1º) Nacimiento

Cuando una nebulosa comienza a derrumbarse bajo el influjo del «tirón hacia adentro» de su propia gravedad, se fragmenta en glóbulos más pequeños, a partir de los cuales se forman **protoestrellas**.

Cada protoestrella gira alrededor de su eje, donde continúa actuando el colapso gravitatorio, que provoca una velocidad de giro creciente. La protoestrella inicial se hace cada vez más compacta y aumenta su densidad, lo que favorece las colisiones entre los átomos de hidrógeno.

El incremento de la frecuencia de estas colisiones aumenta la temperatura del hidrógeno hasta alcanzar el valor crítico de unos $10 \cdot 10^6$ °C, suficientemente elevada para permitir la fusión termonuclear del hidrógeno para formar helio, que se va acumulando en el núcleo de la estrella, y la emisión de una gran cantidad de energía: en este momento la estrella se ha «encendido».

Esta enorme energía liberada haría explotar la estrella si no fuera porque a esta componente expansiva se le opone la fuerza de la gravedad, que tiende a colapsarla; pero ambas fuerzas se equilibran y la estrella permanece estable hasta que consume todo el hidrógeno.

2º) Gigante roja

Tras el agotamiento del hidrógeno, la estrella no puede producir toda la energía nuclear que necesita para mantener una presión capaz de oponerse a la fuerza de la gravedad. En esta fase, la parte central de la estrella se contrae aumentando de nuevo presión y temperatura y provocando de nuevo una fase de combustión nuclear. En este caso del helio.

Este proceso provoca una rápida expansión de la envoltura. La estrella se hace entonces más grande, su temperatura de superficie disminuye y se convierte en una **gigante roja**.

3º) Muerte

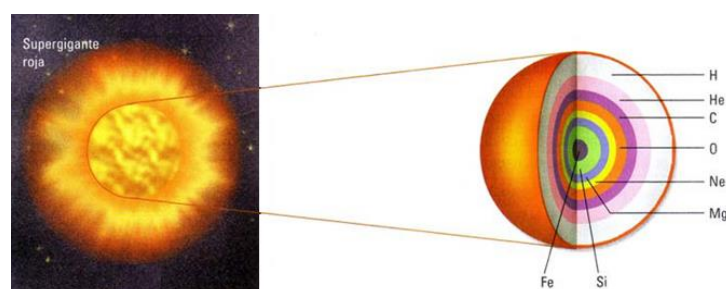
Mientras tanto, el helio se ha ido acumulando en el núcleo de la gigante roja y continúa compactándose hasta alcanzar la temperatura crítica que permita la fusión del helio para formar carbono. La consiguiente liberación de enormes cantidades de energía hará que la estrella se hinche y se vuelva inestable:

- Sus capas externas se desprenden formando un anillo de humo estelar, conocido con el nombre de **nebulosa planetaria** (denominación antigua que nada tiene que ver con los planetas)
- En el interior se aloja el núcleo desnudo de la antigua gigante roja, que se transforma en una estrella denominada **enana blanca**, cuya energía proviene de la fusión del helio que conduce a la síntesis de carbono. El proceso de nucleosíntesis se detiene aquí, por lo que el carbono se va acumulando en el centro de la enana blanca. Cuando agote todo el helio, se enfriará lentamente hasta apagarse por completo, originando una estrella oscura y fría, llamada **enana negra**.

b) En las estrellas mayores que el Sol (más de 10 masas solares)

La **protoestrella** se convierte en **estrella gigante** de un modo similar al anterior, pero al consumir más hidrógeno libera más energía y emite una luz intensa y azulada (también reciben el nombre de **estrellas azules**).

Cuando estas estrellas consumen todo el hidrógeno, el núcleo comenzará a contraerse de nuevo (la presión de la gravedad se hace mayor que la de la radiación del núcleo) lo que aumentará su temperatura permitiendo que comience la fusión de núcleos más pesados. La estrella se hincha y se convierten en **supergigantes rojas**, cuyo gran núcleo está formado por capas concéntricas, cada una de las cuales alberga un proceso diferente de fusión termonuclear que forma un elemento químico distinto (carbono, magnesio, silicio, etc).



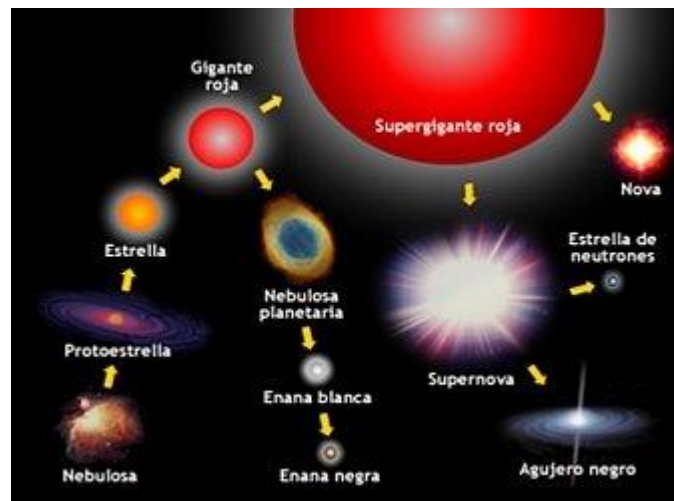
Todas estas reacciones de nucleosíntesis desprenden **energía**; pero la última de ellas, que da lugar a la síntesis del **hierro**, no libera energía, sino que la consume. En este punto la temperatura alcanza los 5.000 millones de grados en su núcleo y el fin de la estrella está próximo.

Con su fuente de energía agotada, tras la síntesis del hierro, actúa la componente gravitatoria y la supergigante roja se colapsa, de tal forma que las ondas de choque generadas por esta tremenda **implosión** rebotan primero en un núcleo extremadamente denso y se propagan después a gran velocidad, produciendo una tremenda **explosión**.

- Como consecuencia de la explosión (**supernova**) se liberan enormes cantidades de energía y casi toda la materia que forma la estrella. En su holocausto nuclear se sintetizan los elementos químicos más pesados que el hierro, que se dispersan por el espacio intergaláctico, junto con el resto de los elementos originados en el interior de la estrella, y constituyen el **polvo cósmico**.

La dispersión de estos elementos pesados por el espacio galáctico «contamina» las **nebulosas** cercanas, y la onda expansiva generada por la explosión puede desencadenar el colapso gravitatorio de otras nebulosas, que formarán nuevas **protoestrellas**. A partir de ellas surgirán nuevas estrellas más ricas en **elementos pesados** que sus predecesoras y, tal vez, alguna presente **sistemas planetarios** orbitando a su alrededor.

- Como consecuencia de la **implosión**, el núcleo de la supergigante roja sufre una compactación tan extraordinaria que queda convertido en:
 - una **estrella de neutrones** si la masa es entre 9 y 30 veces la del Sol. Es un residuo pequeño y enormemente denso que gira rápidamente. Su campo magnético atraparé las partículas cargadas haciendo que emitan una radiación en forma de haz giratorio. Para un observador que se encuentre en la dirección del haz éste aparecerá como una especie de faro que aparece a intervalos regulares de tiempo. La estrella se ha convertido en un **pulsar**.
 - un **agujero negro**, si su masa es superior a 30 veces la solar. Los restos de la supernova sufrirán un colapso gravitatorio que la convierte en algo inimaginablemente denso: un punto de volumen cero con un campo gravitatorio casi infinito (singularidad) del que puede escapar ni siquiera la luz..



En la década de los cincuenta se descubrieron los **quasar** (quasi-stellar radio source), objetos estelares mucho más pequeños que las galaxias (del orden de un millón de veces más pequeños que la Vía Láctea), que emiten una enorme cantidad de energía (cientos de veces más que una galaxia gigante), cuyo brillo fluctúa con períodos que van desde pocos años hasta días, situados a enormes distancias de nosotros (se han descubierto cuasares a 12.000 millones de años luz) y que se alejan a velocidades superiores al 90% de la velocidad de la luz.

A día de hoy la naturaleza de los cuasares es un misterio. Se cree que pueden ser núcleos de galaxias muy jóvenes en las que un agujero negro arrastra la materia situada a su alrededor acelerándola y calentándola a millones de grados lo que explicaría la gran luminosidad de estos objetos.

3.3. NEBULOSAS

Las **nebulosas** son nubes de gas formadas por hidrógeno, helio, elementos químicos pesados en forma de polvo cósmico y cierta cantidad de compuestos orgánicos.

Se han formado por causas diferentes y pueden ser de varios tipos:

- **Nebulosas de emisión**

Emiten radiación (reciben mucha energía de las estrellas cercanas)

Pueden ser:

- Restos de estrellas ya extintas (nebulosas planetarias y remanentes de supernovas)
- Lugares donde nacen las estrellas (condensación de materia) Asociadas a estrellas muy jóvenes o en proceso de formación.

- **Nebulosas de reflexión**

Reflejan la luz de estrellas cercanas (no reciben energía suficiente para hacer que su polvo y gas emitan radiaciones)

Son residuos del gas que dio origen a la estrella.

- **Nebulosas oscuras**

No están relacionadas con una estrella o están muy lejos de ellas.

Solo se ven cuando se interponen contra el fondo estelar (ni emite ni refleja luz aunque si la absorbe)

4. NUESTRO LUGAR EN EL UNIVERSO

4.1. NUESTRA GALAXIA: LA VIA LÁCTEA

La Vía Láctea es una galaxia espiral (Sa, aunque últimamente existen datos que nos inclinan a creer que puede ser del tipo SBa)

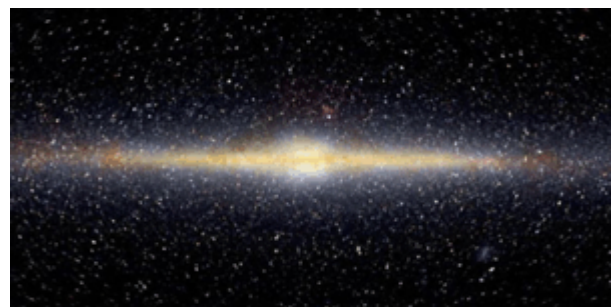
Está formada por entre 100.000 y 300.000 millones de estrellas. Tiene un diámetro de unos 100.000 años luz. La edad de la Vía Láctea se calcula en unos 13.000 millones de años y su masa se estima en un billón (10^{12}) de masas solares.

Está formada por las siguientes estructuras:

- **Bulbo o núcleo.** Formado por un enjambre de varios millones de estrellas viejas con un agujero negro en su centro.
- **Disco.** De forma achatada. contiene polvo cósmico, estrellas más jóvenes y nebulosas, distribuidas en 4 brazos principales en espiral: el de **Perseo**, el de **Sagitario**, el de **Centauro** y el del **Cisne**, y otros secundarios. En uno de estos, el de **Orión**, es donde se encuentra el sistema solar.
- **Halo.** Tiene forma esférica y contiene viejas estrellas agrupadas en cúmulos globulares y algunas estrellas aisladas.



Situación aproximada del Sol en la Vía Láctea (flecha) a 30.000 años luz del centro



La Vía Láctea de perfil fotografiada por el COBE

La Vía Láctea forma parte de un conjunto de 54 galaxias, llamado **Grupo Local**. Está dividido en dos subgrupos:

- 20 galaxias ligadas gravitatoriamente a la Vía Láctea, mucho más pequeñas que ella.
- 15 pequeñas galaxias que rodean a la galaxia M31 (Andrómeda). Ésta tiene un tamaño de 250.000 años luz (más del doble que nuestra galaxia) y está situada a 2,5 millones de años luz de nosotros, aunque se calcula que su masa no es mayor de $4 \cdot 10^{11}$ masas solares.

Además, existe un elevado número de pequeñas galaxias “libres”.

El Grupo Local se encuentra en el borde de una estructura mayor, el **Cúmulo de la Virgen**, formado por entre 1.300 y 2.000 galaxias y que ocupa el centro de otra estructura mayor, el **Supercúmulo de la Virgen**.

4.2. EL SISTEMA SOLAR

4.2.1. COMPONENTES DEL SISTEMA SOLAR

Está formado por el Sol, los 8 planetas y los cuerpos menores (planetas enanos, satélites, asteroides y cometas)

• El Sol

Es una estrella mediana de tipo G2.

Está formado por 71% de hidrógeno, un 27% de helio y un 2% de otros elementos (oxígeno, carbono, silicio, hierro, nitrógeno, etc)

En su núcleo alcanza una temperatura de 15 millones de grados centígrados, mientras que en su superficie es de 6000 °C.

Se encuentra a una distancia de $150 \cdot 10^6$ km de la Tierra (1 unidad astronómica)

• Planetas.

Son cuerpos celestes que orbitan alrededor del Sol, cuyas masas son lo suficientemente grandes para tener forma casi esférica y haber despejado los alrededores de su órbita.

De acuerdo con sus características y posición se diferencia entre:

- Planetas interiores o terrestres.

Incluyen **Mercurio, Venus, la Tierra y Marte**.

Son los planetas que se encuentran más cercanos al Sol.

Tienen un tamaño pequeño, su superficie es rocosa y tienen una atmósfera gaseosa poco extensa o inexistente.

Tienen pocos satélites o ninguno.

- Planetas exteriores o gigantes.

Aquí se incluyen **Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno**.

Son los planetas que se encuentran más alejados del Sol.

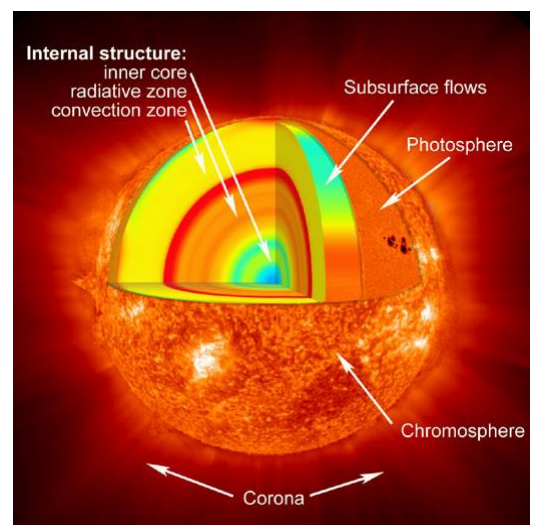
Tienen un tamaño grande, poseen pequeños núcleos rocosos y atmósferas densas y de gran espesor que se encuentran fundamentalmente en estado gaseoso y líquido.

Todos tienen un número elevado de satélites.

• Planetas enanos

Son cuerpos celestes que orbitan alrededor del Sol y tienen una masa lo suficientemente grande para adoptar una forma casi esférica pero no para haber limpiado su órbita.

Aquí se incluyen **Ceres, Plutón, Eris** y, seguramente, varias decenas de cuerpos celestes situados más allá de la órbita de Neptuno



• **Satélites**

Son cuerpos celestes que giran en torno a los planetas. Exceptuando Mercurio y Venus, todos los planetas tienen satélites.

Pueden ser:

- Regulares. Son esféricos y grandes. Se cree que se formaron a la vez que el planeta al que orbitan.
- Irregulares. Son pequeños e irregulares. Se cree que son asteroides atrapados por el campo gravitatorio del planeta al que se acercaron demasiado.

• **Cuerpos menores del sistema solar**

Según la UAI son todos los cuerpos celestes que orbitan en torno al Sol y que no son planetas, ni planetas enanos ni satélites.

Fundamentalmente incluye:

- **Asteroides**

Son cuerpos rocosos menores, generalmente con forma irregular.

La mayoría se encuentra en el **cinturón de asteroides**, entre Marte y Júpiter, o en el **cinturón de Kuiper**, situado más allá de la órbita de Neptuno.

Otros grupos importantes son los **troyanos**, situados en la órbita de Júpiter, y los **centauros**, en la órbita de Saturno.

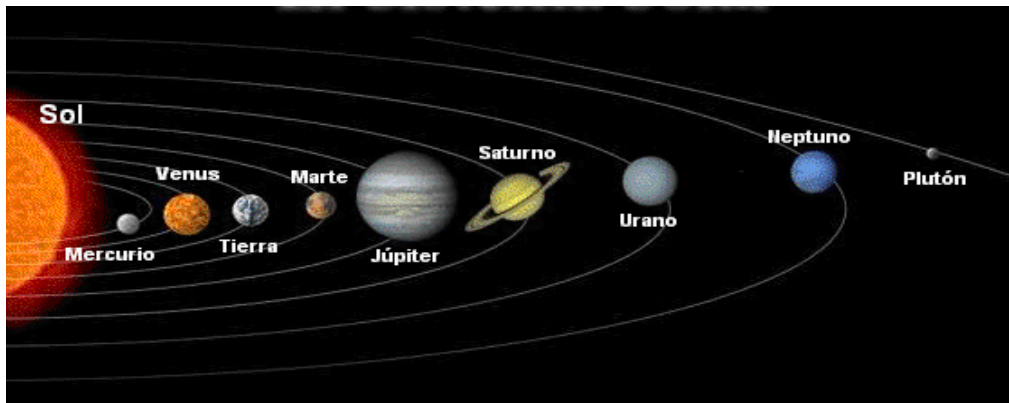
Cuando caen a la Tierra se ponen incandescentes por la fricción con la atmósfera. Si son pequeños se desintegran antes de llegar al suelo (estrellas fugaces) pero a veces son grandes y colisionan con ella (meteoritos).

- **Cometas**

Están constituidos por hielo y partículas de polvo.

Describen órbitas excéntricas e irregulares alrededor del Sol.

Proceden de la **Nube de Oort**, zona exterior del Sistema Solar donde se acumulan los restos de la nebulosa que lo originó.



Planeta	Distancia al sol	Diámetro	Tiempo de traslación	Tiempo de rotación	Temperatura	Satélites	Atmósfera	Imágenes
Mercurio	57.910.000 km	4.880 km	88 días	58 días y medio	Aprox. 400 °C Min. 170 °C	-	-	
Venus	108.200.000 km	12.000 km	225 días	243 días	Aprox. Máx. 450° C	-	nitrógeno y dióxido de carbono	
Tierra	149.600.000 Km	2.756 Km	1 año	24 horas	Aprox. 15 °C	1	nitrógeno y oxígeno	
Marte	227.940.000 km	6794 km	687 días	24 horas	Aprox. -63 °C	2	Dióxido de carbono y 0,03% de agua.	
Júpiter	778.833.000 Km	142.984 Km	12 años	10 horas	-120 °C	63	Hidrógeno, helio, metano y amoníaco	
Saturno	1.429.400.000 Km	120.536 Km.	29,46 años	10,39 horas	-125 °C	33	Hidrógeno, helio y metano	
Urano	2.870.990.000 Km	51.118 Km.	84 años	17 horas	-215 °C	27	Hidrogeno, metano y otros hidrocarburos	
Neptuno	4.504.300.000 Km	49.492 Km	164 años	16,11 horas	-235°C	13	Hidrógeno, helio y metano	

4.2.2. ORIGEN DEL SISTEMA SOLAR

El sistema Solar tiene una serie de características que cualquier teoría sobre su origen debe explicar:

- El Sol, los planetas y satélites (salvo pocas excepciones) giran en el mismo sentido (contrario a las agujas del reloj)
- Las órbitas de todos los planetas son elípticas (de muy baja excentricidad)
- Las distancias al Sol de los planetas siguen una proporción creciente fija (Ley de Titius-Bode)
- Todas las órbitas están en el mismo plano (eclíptica) que coincide con el ecuador solar
- Los planetas interiores son pequeños y densos, y los exteriores, grandes y ligeros
- Todos los cuerpos rocosos (planetas, satélites y asteroides) tienen cráteres de impacto.

La teoría más aceptada sobre el origen del Sistema Solar es la **teoría planetesimal** o **teoría nebular**. Según esta teoría el Sistema solar se formó a partir de una nebulosa.

1º) Colapso de la nebulosa inicial.

Hace unos 4600 m.a. una nebulosa se comprimió y colapsó. La causa parece ser la onda expansiva de una supernova cercana.

2º) Formación del protosol.

Conforme se desplazaban las partículas comenzó a actuar sobre ellas la gravedad y comenzaron a atraerse y a rotar en torno al centro de la nebulosa. La materia se fue concentrando en la zona central y el número de choques entre partículas se fue haciendo cada vez mayor.

Estas colisiones provocaron un aumento progresivo de la temperatura en el centro (protosol). Cuando subió lo suficiente, se iniciaron las reacciones de fusión nuclear, lo que marcó el nacimiento del Sol.

3º) Formación de los protoplanetas

La materia restante se dispuso en bandas que giraban en torno al protosol.

- Las más cercanas contenían elementos más pesados, procedentes del polvo interestelar y darían lugar a los planetas rocosos.
- Las bandas de materia más alejadas contenían elementos más ligeros y darían lugar a los planetas gaseosos.

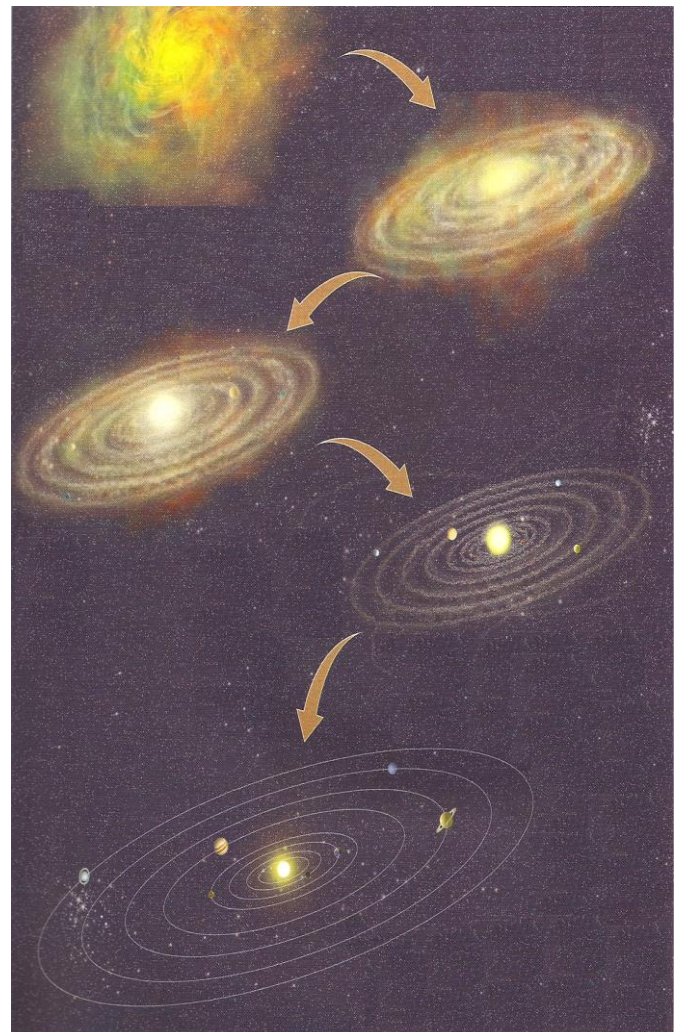
Dentro de cada banda las partículas colisionaban y se reunían entre sí por efecto gravitatorio. Conforme aumentaban de tamaño, el número de colisiones crecía y la fuerza de atracción entre ellas también.

El calor provocado por los choques fusionaba las partículas entre sí. Se formaron cuerpos de tamaño progresivamente mayor, los planetesimales. Su colisión y fusión (acreción) dio origen a los protoplanetas.

Posteriormente estos limpiaron totalmente sus órbitas atrayendo todos los pequeños cuerpos con los que las compartían, transformándose en planetas.

4º) Formación de otros astros

La materia restante formó los satélites (planetesimales que quedaron orbitando alrededor del planeta), los asteroides (planetesimales que no llegaron a formar un planeta), los planetas enanos (protoplanetas que pudieron despejar su órbita) y los cometas (restos de la nebulosa que quedaron demasiado lejos de la atracción gravitatoria del Sol)



4.2.3. FORMACIÓN DE LA TIERRA

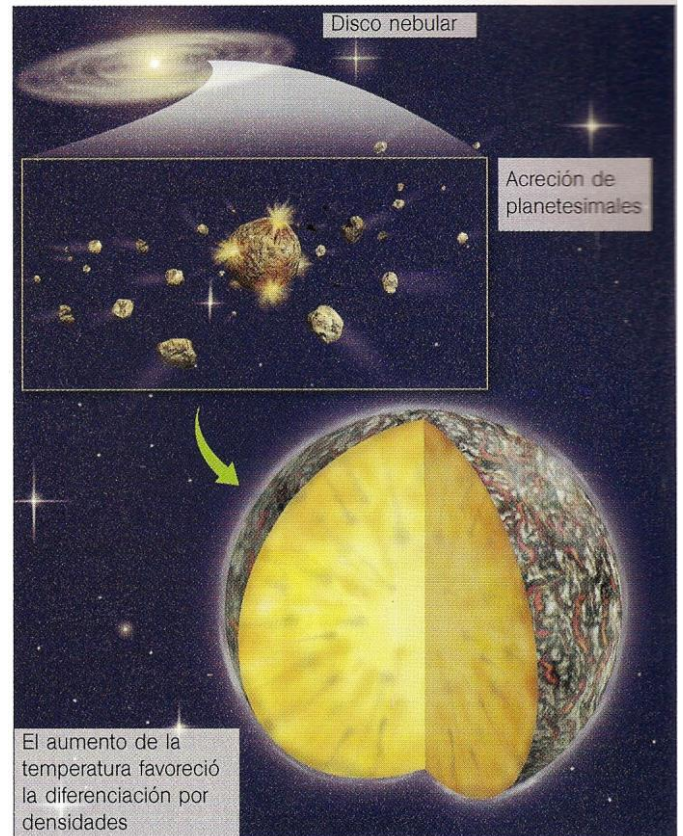
De acuerdo con la teoría nebular, la formación de la Tierra habría seguido el siguiente proceso:

1º) Formación del protoplaneta terrestre.

En el interior del disco nebular que rodeaba al protosol, la unión o acreción de planetesimales originaría el protoplaneta terrestre. A medida que aumentaba su tamaño se incrementaba también su campo gravitatorio, lo que favoreció la acreción de nuevos planetesimales. Dada la posición de la Tierra en el sistema solar, los planetesimales más abundantes en esa zona serían los constituidos por hierro y silicatos, si bien habría otros con más cantidad de elementos volátiles. En esta fase de la formación de la Tierra la temperatura aumentaría como consecuencia de los impactos de los planetesimales.

2º) Diferenciación por densidades.

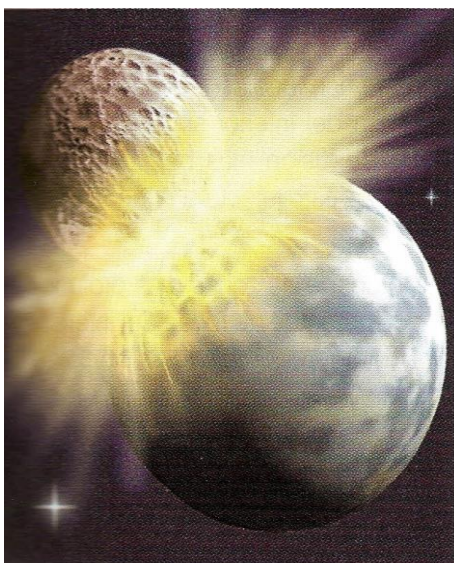
La temperatura de la Tierra primordial debió ser suficiente como para que se encontrara parcialmente fundida. Esto permitió una distribución de sus componentes mayoritarios según su densidad. El hierro ocupó las zonas más profundas formando el núcleo terrestre, proceso que se conoce como la "catástrofe del hierro". Al mismo tiempo ocurrió la desgasificación del planeta, es decir, los gases del interior escaparon y dieron lugar a la atmósfera. Entre aquellos gases abundaba el vapor de agua.



3º) Enfriamiento de la superficie y formación de los océanos.

Una vez que se redujo el bombardeo de los planetesimales, la Tierra comenzó a enfriarse. El descenso de la temperatura de las rocas superficiales permitió que el vapor de agua se condensara. Las aguas ocuparon los relieves más bajos y se formaron los océanos. Hace 4200 millones de años había ya océanos.

4.2.4. ORIGEN DE LA LUNA



Las teorías clásicas defienden que La Luna pudo haberse formado al mismo tiempo que la Tierra y siguiendo un proceso paralelo.

Sin embargo, la Luna tiene 100 m.a menos que nuestro planeta, y estando en la misma zona del sistema solar sus densidades deberían ser similares. No es esto lo que ocurre, la densidad de la Tierra es de $5,5 \text{ g/cm}^3$ mientras que la de la Luna es de $3,3 \text{ g/cm}^3$.

La teoría más aceptada hoy propone que en los primeros momentos de la existencia de la Tierra, un planeta de tipo terrestre y con un tamaño similar al de Marte, colisionó con la Tierra.

Parte del astro que impactó, junto con materiales de la zona impactada, constituyó una nube de residuos que quedó orbitando en torno a la Tierra. La acreción de estos materiales originaría la Luna.

Los materiales terrestres que participaron en la formación de la Luna fueron los del manto y corteza, no los del núcleo, lo cual explica la diferencia de densidades