

*“Yo quiero conocer los pensamientos de Dios; el resto son detalles”*

*A. Einstein*

**Índice:**

- ✓ [Introducción](#)
- ✓ [Perspectivas históricas](#)
- ✓ [Física y Cosmología aristotélica](#)
- ✓ [La Tierra deja de ser el centro del Universo](#)
- ✓ [Copérnico, Kepler, Galileo y Newton](#)
- ✓ [Unión del cielo y la Tierra](#)
- ✓ [Relación entre la materia y la energía, y entre el tiempo y el espacio](#)
- ✓ [Extensión del tiempo](#)
- ✓ [Movimiento de los continentes](#)
- ✓ [Comprensión de la naturaleza del fuego](#)
- ✓ [División del átomo](#)
- ✓ [¿Qué es una onda?](#)
- ✓ [El efecto Doppler](#)
- ✓ [Radiación del cuerpo negro](#)
- ✓ [Variación de la temperatura en la expansión de un gas](#)
- ✓ [Aprovechamiento de la energía](#)
- ✓ [Cosmología científica](#)
- ✓ [El principio cosmológico](#)
- ✓ [El Universo en expansión](#)
- ✓ [Radiación Cósmica de Fondo \(CMB\)](#)
- ✓ [Abundancia de los elementos en el Universo](#)
- ✓ [Paradoja de Olber](#)
- ✓ [La teoría del Big Bang](#)
- ✓ [Calendario de C. Sagan](#)
- ✓ [Teoría del Universo estacionario y Teoría del Universo pulsante](#)
- ✓ [Calculo de la masa crítica del Universo](#)
- ✓ [Descubrimientos recientes – Materia oscura y energía oscura](#)
- ✓ [Conclusiones](#)
- ✓ [Bibliografía](#)
- ✓ [Referencias de Cosmología en la Web](#)

**Nota:** Este resumen o compilación de Cosmología, hace uso de las siguientes fuentes:

1. - *Project 2061 - Alfabetización científica para un futuro dinámico - Sitio de la Asociación Norteamericana para el avance de la ciencia.* <http://www.project2061.org/>
2. - [Cosmología - El Origen del Universo](#) - Breve Introducción - [http://www.astrored.net/origen\\_del\\_Universo/](http://www.astrored.net/origen_del_Universo/)
3. - [Curso básico de Cosmología](#)- de Pedro J. Hernández [www.geocities.com/launchpad/2921/comolog.htm](http://www.geocities.com/launchpad/2921/comolog.htm)

## Introducción

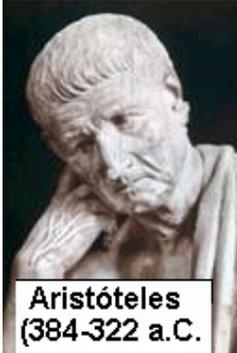
Los orígenes del Universo y de la vida han sido cuestiones que siempre han cautivado a la humanidad. En ese sentido tal vez no sea casual que el primer libro de la Biblia sea justamente el Génesis. A lo largo del tiempo se desarrollaron diversas teorías cosmológicas y cosmogénicas que intentaron explicar el origen y estado actual del Universo. Con el término Cosmogonía designamos al conjunto de teorías míticas, religiosas, filosóficas y científicas que intentan explicar el origen del mundo. Actualmente la cosmogonía científica es equivalente a la cosmología. Sin embargo, el término “cosmogonía” pone más énfasis en el “origen” mientras la cosmología es más general e incluye el estudio del estado actual del Universo. De todos modos, estas dos características del Universo, su estado actual y su origen, como veremos más adelante, están íntimamente relacionados.

Según la visión actual de la ciencia, creemos que el Universo tuvo su origen en un evento conocido como el Big Bang (BB) hace unos 15 mil millones de años. Esta teoría científica, se basa en muchas observaciones empíricas que se fueron acumulando a lo largo de casi todo el siglo XX y estos estudios y observaciones siguen realizándose actualmente. Uno de los primeros indicios de este evento (el Big Bang) provino del descubrimiento realizado por E. Hubble, en la década de 1920, que el Universo se está expandiendo y las galaxias se alejan entre sí. En realidad como veremos más adelante, una observación tan simple y directa como la existencia de las nebulosas (Paradoja de Olber) también esta relacionada con el origen en un tiempo finito del Universo. Si las Galaxias se están separando, es claro que en el pasado ellas estaban más cerca. Retrocediendo lo suficiente en el tiempo se llega a la conclusión de que todo el Universo parece haber salido de un único punto, como si todo hubiese estallado o explotado de dicho punto. Esta gran explosión la designamos como el Big Bang. Hoy hay muchas más evidencias observacionales que están de acuerdo con la hipótesis del Big Bang, entre ellas: el descubrimiento en los años 60 de la radiación de fondo cósmica (MCB), la abundancia de los elementos livianos, etc. El objetivo de este resumen es explorar las evidencias que avalan la teoría del Big Bang.

En una primera aproximación, parecería muy difícil conocer algo acerca de un evento tan remoto como significativo. Sin embargo, como veremos, dicho estudio es posible y es quizás uno de los campos más activos y fascinantes de la ciencia moderna. En cierto modo esta aventura del pensamiento, es equivalente a investigar un crimen. En ambos casos usamos la lógica y algunas hipótesis comunes. Por ejemplo que las mismas leyes de la naturaleza valen hoy como entonces. Si en la escena del asesinato de una persona, encontramos manchas de sangre y cabellos de otra persona, el estudio del ADN contenido en los indicios encontrados puede servir para al menos imputar a otra persona cuyo ADN coincida con los hallados. Si la persona imputada intentara desvincularse del crimen aduciendo que ahora tiene un ADN que coincide con el encontrado, pero que al momento del crimen tenía otro, su argumento sería claramente rechazado, pues esto viola las leyes de la naturaleza. Hasta ahora no hemos encontrado ningún indicio que el ADN de una persona cambie significativamente de un día para otro. De igual modo, la investigación de nuestro origen, partirá de la premisa que la naturaleza obedece leyes que creemos valen hoy como entonces.

## Perspectiva histórica y filosófica

### Física y cosmología aristotélica



En la concepción de Aristóteles<sup>1</sup>, los cuatro elementos constituyentes de todos los cuerpos materiales eran: el fuego, el aire, el agua, y la tierra. Cada uno de ellos tenían propiedades de movimientos intrínsecas a su naturaleza. Así, liberado a si mismo un trozo de tierra tenía un movimiento "natural" vertical y descendente hacia el centro de la Tierra (que coincidía con el centro mismo del Universo), mientras que el fuego, tenía un movimiento "natural" vertical y ascendente. De esta forma, la tierra era naturalmente un elemento pesado (grave) y el fuego era naturalmente liviano. El aire y el agua ocupaban una posición intermedia entre estos extremos.

Para que un cuerpo grave (tierra) comience a moverse, era necesario aplicarle una fuerza. Aún los vocablos animados (con alma) e inanimado (sin alma) reflejan esta concepción. De este modo, *lo que se mueve se mueve por otro*. La noción que caracteriza la rapidez del movimiento es el tiempo que se demora en recorrer una dada distancia, que podríamos asimilar a nuestro concepto actual de velocidad. En este punto es importante tener en cuenta que los conceptos modernos no son totalmente asimilables a la de la antigüedad<sup>1</sup>, pero haciendo esta salvedad, trataremos de usar un lenguaje moderno y matemático para explicar más sencillamente las ideas de Aristóteles. A propósito, la forma matemática de expresar las leyes físicas se inicia precisamente con Galileo. Usando un anacronismo, podemos decir que en la concepción de Aristóteles, la velocidad  $v$  que adquiere un cuerpo es proporcional a la fuerza aplicada  $F$  e inversamente proporcional a la resistencia o *espesura del medio*  $R$ . O sea:  $v = F/R$ . Si arrastramos un tronco tirando con un caballo, una cierta distancia  $d$ , en un dado tiempo  $T$ , usando dos caballos (duplicando la fuerza), podremos hacerlo en aproximadamente la mitad del tiempo,  $T/2$  (duplicamos la velocidad). También esta ley explica porqué es más fácil correr en el aire que hacerlo dentro del agua; esta última tiene más resistencia (mayor  $R$ ). Como se ve, estas ideas de Aristóteles, y que podríamos llamar la física del sentido común, no son absurdas. Permiten explicar en forma simple muchos fenómenos que observamos en la vida diaria. Piense por ejemplo que haría si quiere aumentar la velocidad de una lancha, claramente pondría más remeros, o el mismo número de remeros pero más fuertes, o sea aumentan  $F$ . Asimismo, para aumentar  $v$ , trataríamos de reducir la resistencia,  $R$ , haciendo la lancha más delgada. Esta concepción es aun prevalente en el público en general, por ser nociones muy "intuitivas".

Dentro de este esquema, era claro que la Tierra debería estar inmóvil. Si todas sus partes (cualquier trozo de Tierra, por ejemplo una piedra) se mueven naturalmente hacia el centro, es claro que como un todo, ella misma debe ser esférica y centrada en dicho punto, el centro mismo del Universo. Vemos así que dentro de la física de Aristóteles no es sencillo transformar a la Tierra en un simple planeta más. El movimiento no es relativo en este paradigma.

Asimismo, si lo que se mueve se mueve por otro, y así sucesivamente, esto no puede continuar indefinidamente, como bien sostenía Aristóteles. Debe haber una causa

última del movimiento. Este era el lugar ideal para colocar una divinidad, y Santo Tomás de Aquino, no dudó en usar este argumento para probar la existencia de Dios.

Otras consecuencias importantes de esa concepción, son las implicancias de la misma en la caída de los cuerpos. El peso de los cuerpos,  $P$ , es claramente la fuerza motriz que hace que los cuerpos caigan, o sea  $F=P$ . Al igual que para el tronco discutido en el ejemplo anterior, cuanto mayor sea la fuerza ejercida (mayor peso) mayor será la rapidez  $v$  con que el cuerpo cae. De este modo, razonando lógicamente a partir de los postulados de Aristóteles, podemos afirmar que a mayor peso, el tiempo que demora un cuerpo en caer desde una misma altura debe ser menor. Es importante en este punto reparar que la caracterización del movimiento antes de Galileo era muy rudimentaria. En particular la idea de *aceleración* no fue identificada claramente hasta los tiempos de Galileo mismo.

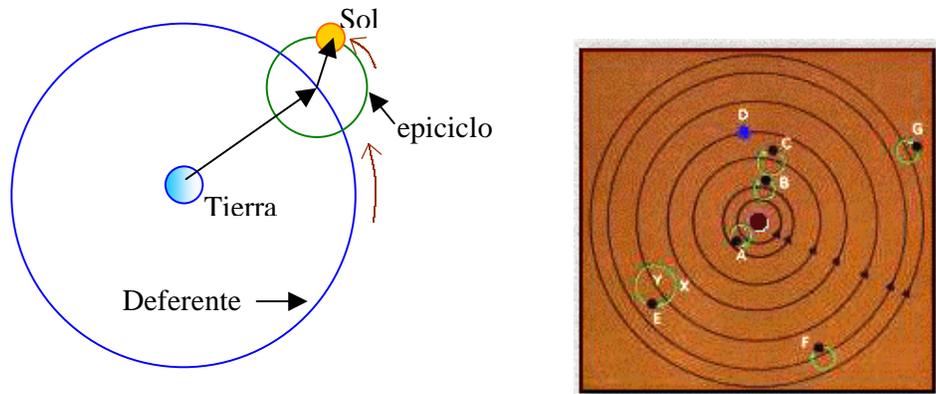
Para Galileo, el estado natural de un cuerpo es tanto el reposo como el movimiento en línea recta con velocidad constante. De modo que en este esquema no hay necesidad de una divinidad que "empuje" al mundo, el mismo puede hacerlo por su propia inercia. También Galileo, usando un razonamiento que aún hoy nos maravilla por su contundencia y brillantez, sostenía que el tiempo de caída de todos los cuerpos desde una dada altura es el mismo, siempre que el roce del aire sea despreciable o equivalentemente la caída se produzca en el vacío. Más precisamente, lo que sostiene Galileo es que la caída de los cuerpos se realiza con una aceleración constante igual a  $g$  ( $\approx 9.8 \text{ m/s}^2$ ) para todos los cuerpos, pesados o livianos. De este modo, cuando confrontamos estas dos concepciones sobre la caída de los cuerpos, no estamos realizando un experimento más, estamos recreando el drama de la transición de la infancia aristotélica de la física a su madurez newtoniana. Como todo crecimiento, la de la física tuvo su dosis de padecimientos y desgarros propios de estos periodos.

Galileo razonaba así; imaginemos que tenemos dos objetos, uno pesado y otro liviano, que dejamos caer desde una dada altura. Según sostenía Aristóteles, el cuerpo pesado caerá en un tiempo  $T_{pes}$  que será menor que el tiempo que demora en caer el más liviano ( $T_{liv} \geq T_{pes}$ ) que es más lento. Entonces, si atamos ambos cuerpos, el "paquete" así formado debería caer en un tiempo  $T_{12}$ , intermedio entre  $T_{pes}$  y  $T_{liv}$ , es decir  $T_{pes} \leq T_{12} \leq T_{liv}$ , ya que el liviano tenderá a frenar al más pesado que es más rápido. Por otro lado, el paquete formado por ambos, es necesariamente más pesado que los cuerpos originales y por consiguiente, debería de caer más rápido que los dos cuerpos originales, por lo tanto  $T_{12} \leq T_{pes} \leq T_{liv}$ . Vemos que estas dos conclusiones son contradictorias ( $T_{pes} \leq T_{12}$  y  $T_{12} \leq T_{pes}$ ) a menos que  $T_{12} = T_{pes} = T_{liv}$ . *O sea que la única posibilidad lógica es que todos los cuerpos, en ausencia de roce, caigan desde una misma altura en igual tiempo.*

Sin embargo, abandonar la física de Aristóteles era abrir las puertas al Universo copernicano, donde con la "democratización" de los planetas nos reduciríamos a meros habitantes de un planeta más, girando alrededor de una estrella, tal vez tan vulgar como el resto de las millones que podemos ver. Ya la Tierra y el Universo no parecerían haber sido creados para que nosotros nos enseñoreemos de ella. También nuestras certezas acerca de la existencia de un Dios, como la causa última del movimiento, parecerían escaparse como agua entre los dedos.

## La Tierra deja de ser el centro del Universo

Para los observadores sobre la Tierra parece que ésta se mantiene quieta y todo lo demás se mueve a su alrededor. Así, al tratar de imaginar cómo funciona el Universo, pareció razonable en épocas antiguas, iniciar su búsqueda partiendo de estas verdades aparentes. Los antiguos pensadores griegos, en especial Aristóteles, establecieron un patrón que duró 2000 años aproximadamente: una gran Tierra estacionaria en el centro del Universo, y puestos alrededor de ésta el Sol, la Luna, y pequeñas estrellas ordenadas en una esfera perfecta, con todos estos cuerpos orbitando en círculos perfectos a velocidades constantes. Poco después del comienzo de la Era cristiana, este concepto básico fue transformado en un modelo matemático poderoso por un astrónomo greco-egipcio Ptolomeo (Claudius Ptolemaeus). Su modelo de movimientos circulares perfectos sirvió bien para predecir las posiciones del Sol, la Luna y las estrellas. También explicó algunos de los movimientos en el espacio que parecían claramente irregulares. Unas pocas "estrellas errantes" (los planetas) no parecían girar perfectamente alrededor de la Tierra, sino que más bien cambiaban su velocidad, y a veces iban en reversa, siguiendo trayectorias de zigzag y de patrones desiguales. Este comportamiento fue explicado en el modelo de Ptolomeo añadiendo más círculos, los cuales giraban sobre los círculos principales.



**Figura 1.** Modelo geocéntrico de Ptolomeo. El diagrama de la izquierda indica el movimiento del Sol. El mismo se mueve sobre un círculo (Epiciclo) cuyo centro a su vez se mueve sobre otro círculo (Deferente). A la derecha se muestra como se mueven el resto de los planetas alrededor de la Tierra siguiendo la misma idea de [Deferentes y epiciclos](#).

La obra cumbre de Ptolomeo, Colección Matemática, es más conocida en su forma árabe, *Almagesto*. Esta obra incluye un catálogo de 1022 estrellas basado en el catálogo de Hiparco, y describe con todo detalle la cosmología grecoromana: la Tierra en el centro del Universo, esférica y de tamaño despreciable, rodeada por ocho esferas concéntricas. Las siete primeras corresponden a los planetas conocidos entonces (la Luna, Mercurio, Venus, el Sol, Marte, Júpiter y Saturno) y la octava a las estrellas fijas. Más allá podría haber otras esferas transparentes e invisibles, sin astros, terminando en el *primum mobile* (primer móvil) cuyo movimiento arrastraría el de todas las demás. Para explicar los movimientos anómalos de los tres planetas exteriores (Marte, Júpiter y Saturno), que a veces se adelantan y a veces se atrasan respecto a las estrellas fijas, Ptolomeo recurrió a la teoría de los epiciclos de Apolonio de Pérgamo, ver Fig. 1, que supone que cada uno de

estos astros realiza un movimiento circular alrededor de su propia esfera, que se superpone al de ésta alrededor de la Tierra. La cosmología de Ptolomeo dominó el pensamiento islámico y occidental durante toda la Edad Media, y no fue puesta en duda hasta el siglo XVI, cuando Nicolás Copérnico publicó su teoría heliocéntrica.

En los siglos siguientes, conforme los datos astronómicos se acumulaban y llegaban a ser más precisos, este modelo fue refinado y complicado por muchos astrónomos, incluyendo árabes y europeos. Algunas de estas modificaciones, implicaban introducir nuevos epiciclos montados sobre los originales. Por muy inteligentes que fueran los refinamientos en los modelos de círculos perfectos, *no implicaban ninguna explicación física de por qué los cuerpos celestes debían moverse de esa manera*. Los principios del movimiento en el espacio se consideraron muy diferentes de los del movimiento en la Tierra. Prevalcía la teoría de Aristóteles, de que los cuerpos celestes (Estrellas, planetas, etc) estaban compuestas del quinto elemento (*quintessence*) o Eter, que era incorruptible y cuyo estado natural era un movimiento en círculos perfectos.



**Copérnico:** Poco después del descubrimiento de América, un astrónomo polaco llamado Nicolás Copérnico, contemporáneo de Martín Lutero y Leonardo da Vinci, propuso un modelo diferente del Universo. Descartando la premisa de una Tierra estacionaria, demostró que si ésta y todos los planetas giraran alrededor del Sol, el movimiento aparentemente errático de los planetas podía explicarse en una forma intelectualmente más satisfactoria. Pero el modelo de Copérnico, siguiendo la tradición aristotélica, todavía usaba movimientos circulares perfectos y era casi tan complicado como el viejo modelo de la Tierra en el centro. Además, su modelo violaba las nociones de sentido común y de la física prevalecientes acerca del mundo. Ese modelo requería que la Tierra, aparentemente inmóvil, girara por completo sobre su eje una vez al día y que el Universo fuera mucho más grande de lo que se había imaginado y lo peor de todo era que la Tierra se convirtiera en un lugar común perdiendo su posición en el centro del Universo. Más tarde, se pensó que una Tierra que orbitara y girara era incompatible con algunos pasajes bíblicos.

*Entonces Josué habló a Jehová y Jehová entregó a los amorreos ante los hijos de Israel, y dijo en presencia de los israelitas: ¡Sol, detente sobre Gabaón; y tú Luna, sobre el valle de Ajalón! Y el Sol se detuvo y la Luna se paró, hasta que el pueblo se hubo vengado de sus enemigos. El Sol se detuvo en medio del cielo, y no se apresuró a ponerse por casi un día entero. Josué 10:10-24*

La mayoría de los eruditos notaron muy poca ventaja en un modelo con el Sol en el centro, y un costo muy alto si renunciaban a muchas otras ideas asociadas con el modelo tradicional de la Tierra en el centro y en fragante contradicción con las concepciones físicas de la época, el modelo aristotélico de la física.

En síntesis, el sistema heliocéntrico de Copérnico se caracteriza por:

- ✓ Una relativa facilidad para explicar el movimiento retrógrado de los planetas y en mostrar por qué sus posiciones relativas al Sol determinaban tal movimiento.
- ✓ Proporcionaba una base sobre la cual determinar las distancias al Sol y a la Tierra.

✓ Su teoría lunar era más simple. Se evitaban los enormes cambios en la posición aparente de la Luna (paralaje lunar) del modelo de Ptolomeo.

Las objeciones que cabría hacerle a este sistema son:

✓ No explica de manera satisfactoria las considerables variaciones de las velocidades angulares de los planetas en sus órbitas. Por lo tanto la capacidad predictiva de la posición de los planetas no era mejor que el modelo de Ptolomeo.

✓ No elabora un sistema físico viable y adecuado al tipo de problemas que presenta una Tierra en movimiento.

✓ Si la Tierra se mueve, ¿por qué no se nota una variación de la posición aparente de las estrellas? En realidad no se observa ninguna variación (ausencia de cualquier paralaje anual de las estrellas fijas).

El gran aporte del sistema de Copérnico se concreta en tres ideas:

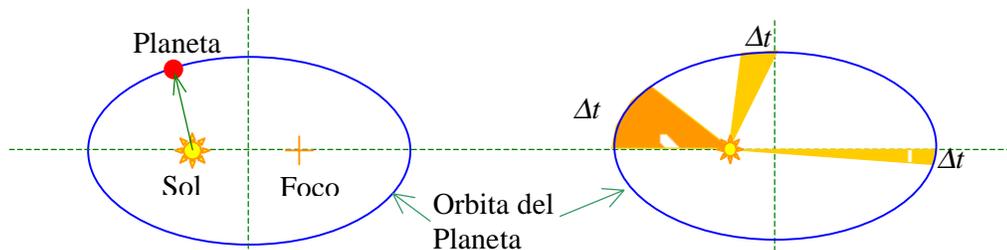
✓ Introducción del principio cosmológico. La Tierra no es un lugar especial del Universo, sino un planeta como todos los demás.

✓ Una modificación de las ideas vigentes en la época acerca de la naturaleza de la materia, de los planetas, del Sol, de la Luna y de las estrellas.

✓ Una modificación de la naturaleza y acciones de la fuerza en relación con el movimiento, es decir, de la física aristotélica imperante entonces.



**Kepler:** A fines del siglo XVI, las mediciones astronómicas se hicieron más precisas. Un astrónomo que contribuyó grandemente en esta empresa fue el danés Tycho Brahe (1546-1600). Tycho era un astrónomo precavido y cauteloso. Poseía un carácter tiránico y una nariz postiza de plata (la suya la había perdido en un duelo estudiantil) y entregado a varios tipos de excesos. Usando un sextante gigante (el telescopio no se había inventado aún) logró las mediciones más precisas de su tiempo sobre el movimiento de los planetas. Esto condujo a poner en evidencia que ni el heliocentrismo copernicano ni el geocentrismo ptolomeico podrían funcionar mientras todos los planetas tuvieran un movimiento circular uniforme. Un astrónomo alemán, *Johannes Kepler*, contemporáneo de Galileo, desarrolló un modelo matemático del movimiento planetario que descartaba ambas premisas tan respetables: una Tierra estacionaria y un movimiento circular para los cuerpos celestes. Postuló tres leyes, la más revolucionaria de las cuales fue que los planetas se movían naturalmente por sí mismos en órbitas elípticas a velocidades variables, aunque predecibles. A pesar de que estas leyes resultaron correctas, los cálculos para las elipses eran difíciles con las matemáticas conocidas en ese tiempo. Kepler no ofreció ninguna explicación de por qué los planetas se movían de esa forma contraria a las expectativas aristotélicas tan arraigadas.



**Figura 2.** Ilustración esquemática de las dos primeras leyes de Kepler.

- ✓ **Primera ley:** Los planetas describen órbitas elípticas estando el Sol en uno de sus focos.
- ✓ **Segunda ley:** El vector posición de cualquier planeta respecto del Sol barre áreas iguales de la elipse en tiempos iguales. Cuando el planeta está más alejado del Sol (afelio) su velocidad es menor que cuando está más cercano al Sol (perihelio).
- ✓ **Tercera ley:** Los cuadrados de los periodos de revolución ( $T$ ) son proporcionales a los cubos de los semiejes mayores ( $R$ ) de la elipse. Es decir:  $T^2 = k \cdot R^3$ , donde  $k$  es una constante de proporcionalidad igual para todos los planetas.

Lo más significativo del aporte de Kepler, es que con estas leyes logra por primera vez dar una descripción completa y exacta del movimiento de todos los planetas del sistema solar con una precisión hasta entonces desconocidas.



**Galileo:** Las múltiples contribuciones de Galileo, quien fue coetáneo de Shakespeare y Rubens, fueron de gran importancia en el desarrollo de la física y la astronomía. Como astrónomo, construyó, utilizó y perfeccionó el telescopio recién inventado por fabricantes holandeses para estudiar el Sol, la Luna, los planetas y las estrellas, y realizó un sinnúmero de descubrimientos que apoyaban la idea básica de Copérnico del movimiento planetario. Posiblemente, la idea de usar el telescopio para estudiar los cielos, sea uno de los avances más significativo de la ciencia. Uno de los

hallazgos más significativos realizado por Galileo fue descubrir cuatro lunas que giraban alrededor del planeta Júpiter (hoy conocemos una docena de ellas), demostrando que la Tierra ( o el Sol ) no eran los únicos centros de movimiento celeste. Con el telescopio, también descubrió los inexplicables fenómenos de los cráteres y las montañas en la Luna, las manchas en el Sol, las fases de Venus parecidas a las lunares, y un gran número de estrellas invisibles para un ojo normal. Todo esto sugería que muchas de las características de la Tierra y la Luna no eran únicas, sino más bien fenómenos comunes al Universo. Además, algo que fue muy importante, y que se vuelve evidente para todo el que mira el cielo con el telescopio, es que *el espacio tiene profundidad*. Es decir las estrellas se extienden tridimensionalmente por el espacio, indicando que ellas no están fijadas en una esfera cristalina, como hasta entonces se creía y como una mirada poco atenta al cielo puede reflejar, sino que el Universo se revelaba como indefinido.

Otra gran contribución de Galileo a la revolución cosmológica fue divulgar sus descubrimientos, en una forma y lenguaje accesibles a todas las personas educadas de su época. También refutó muchos argumentos populares en contra de una Tierra que estuviera en órbita y girara sobre su eje, y mostró inconsistencias en la explicación del movimiento de Aristóteles, en particular en lo que respecta a la *caída de los cuerpos* y fue el pionero en desarrollar el *principio de inercia*.

En un momento, estudiando las mareas, Galileo creyó encontrar evidencias que el modelo copernicano era cierto y que la Tierra efectivamente giraba alrededor del Sol (hoy sabemos que la explicación de las mareas propuesta por Galileo no es correcta). Entonces a Galileo se le ocurrió la poco feliz idea de iniciar una campaña para lograr que la Iglesia modificara las Sagradas Escrituras para acomodarla al modelo copernicano. La vehemencia y quizás la falta de tino de Galileo, sumada al autoritarismo y fanatismo de algunos clérigos que habían elevado el modelo de Ptolomeo y la física de Aristóteles al nivel de dogma, condujeron a una de las más lamentables tragedias de la ciencia. Galileo fue llevado ante la Inquisición por sus supuestas creencias heréticas, en particular por su adhesión ferviente al modelo copernicano. La abjuración de Galileo es una pieza conmovedora de las consecuencias del dogmatismo y fanatismo:

Con la camisa blanca de penitente, el anciano se arrodilló sumiso sobre el pulido suelo de la nave principal del convento de Santa María Sopra Minerva. Agobiado por el calor de la cálida mañana de verano, comenzó a leer con voz suave y alta:

*Yo, Galileo, hijo del difunto Vincenzo Galilei, florentino, de 70 años, emplazado personalmente ante este tribunal y arrodillándome ante vos, eminentísimo y reverendísimo señor cardenal inquisidor general contra la iniquidad herética de toda la comunidad cristiana, teniendo ante mis ojos y tocando con mis manos los Sagrados Evangelios, juro que siempre creí, creo y, con la ayuda de Dios, creeré en el futuro todo lo que la Santa Iglesia católica y apostólica cree, predica y enseña. Por cuanto—después de haberseme notificado judicialmente un requerimiento por este Santo Oficio al efecto de que debo abandonar completamente la falsa opinión de que el Sol está inmóvil y es el centro del mundo, y que la Tierra no es el centro del mundo y se mueve, y que no debo sostener, defender o enseñar de ninguna manera, ya sea verbalmente o por escrito, la dicha falsa doctrina, y después de haberseme notificado que dicha doctrina era contraria a las Sagradas Escrituras—escribí e imprimí un libro en el que trato esta nueva doctrina ya condenada y aduzco argumentos de gran consistencia en su favor sin presentar ninguna solución para ellos, he sido declarado por el Santo Oficio sospechoso vehemente de herejía, es decir, de haber sostenido y creído que el Sol es el centro del mundo y es inmóvil, y que la Tierra no es el centro y se mueve.*

*Por tanto, deseando quitar de la mente de sus eminencias, y de todos los cristianos creyentes, esta sospecha vehemente con justicia concebida contra mí, con sincero corazón y verdadera fe, yo renuncio, maldigo y detesto los antedichos errores y herejías y todo otro error, herejía y secta, cualquiera que sea, contraria a la Santa Iglesia, y juro que en el futuro no volveré a decir ni afirmar, verbalmente o por escrito, nada que pueda dar ocasión a una sospecha similar sobre mí;*

El anciano, con voz entrecortada, murmuró:

*pero, si llego a conocer a cualquier hereje o persona sospechosa de herejía, lo denunciaré a este Santo Oficio o al inquisidor u ordinario del lugar donde me encuentre.*

Además, juro y prometo cumplir y observar en su integridad todas las penitencias que me hayan sido o me sean impuestas por este Santo Oficio.

La leyenda dice que cuando Galileo se levantó después de estar arrodillado y retractarse, murmuró para sí: "¡Eppur si mouve!" (¡Pero se mueve!).

Quizás, una paradoja del destino hizo que todo este proceso contribuyera a llamar más la atención en sus ideas. De esa forma se aceleró el proceso de cambio de las ideas a cerca de la física y la astronomía. Sin embargo, lo que sí logró la Inquisición fue detener por bastante tiempo el desarrollo de la ciencia en Italia y otros países del mediterráneo y poner fin a uno de los períodos de mayor esplendor del espíritu humano, el Renacimiento. Por tal motivo muchas veces nos referimos a Galileo como el último renacentista.



### Unión del cielo y la tierra - Newton

Pero le correspondió a Isaac Newton, un científico inglés, unir todos esos hilos, e ir más allá para crear la idea del nuevo Universo. Una cita conocida de Newton es aquel dicho: "Si pude ver más lejos, fue porque estaba montado sobre el hombro de un gigante". Seguramente el gigante al que se refería Newton era Galileo, que a la sazón era una persona de muy baja estatura, pero claramente con la visión de un coloso. En su libro "Principios Matemáticos de la Filosofía Natural", publicado a fines del siglo XVII e indudablemente una de las obras más influyentes de todos los tiempos, Newton presentó un modelo matemático impecable del mundo, en el que reunió el conocimiento del movimiento de los objetos en la Tierra y el de los movimientos distantes de los cuerpos celestes.

### Dos paradigmas del movimiento diferentes

Aristóteles	Galileo-Newton
<i>Estado natural:</i> reposo	<i>Estado natural:</i> reposo o movimiento uniforme
Movimiento $\leftrightarrow$ Fuerza	Aceleración $\leftrightarrow$ Fuerza
No identificaba el roce	El roce es una fuerza más

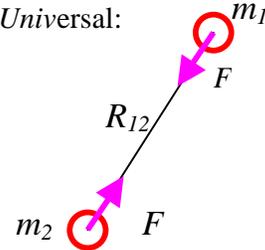
El mundo newtoniano fue sorprendentemente sencillo: utilizando unos pocos conceptos clave: masa, aceleración y fuerza, pudo explicar brillantemente la dinámica del movimiento usando sus tres leyes del movimiento, estas son:

1. *Primera ley - Principio de inercia:* En ausencia de fuerzas externas, todo cuerpo tiende a preservar su estado de movimiento, si esta en reposo seguirá en reposo y si esta moviéndose, continuará haciéndolo en línea recta y con velocidad constante.
2. *Segunda Ley:* Dependencia de la aceleración ( $a$ ) de la fuerza ( $F$ ) y de la masa ( $m$ ):  
 $a = F/m$  o bien  $F = m \cdot a$  (1)
3. *Tercera Ley o Principio de acción y reacción:* Cuando un cuerpo 1 ejerce una fuerza ( $F_{12}$ ) sobre otro cuerpo 2, el segundo reacciona sobre el primero con una fuerza igual

y de signo contrario, reacción. Nótese que siempre la acción y la reacción están aplicadas sobre cuerpos diferentes.

Además de establecer las leyes básicas del movimiento de los cuerpos, Newton descubrió la ley matemática de cómo la fuerza gravitatoria de atracción entre dos masas depende de la distancia. Es decir la famosa *ley de la gravitación Universal*:

$$F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{R_{12}^2}, \quad \text{con} \quad G = 6.67 \times 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{Kg^2} \quad (2)$$



Aquí  $G$  es la constante de la gravitación universal,  $R_{12}$  es la distancia que separa las masas  $m_1$  de  $m_2$  y  $F$  es la fuerza de atracción gravitatoria que ejercen las masas entre sí. Nótese que por acción y reacción la fuerza que ejerce la masa 1 sobre la 2 es la misma pero de signo opuesto a la que ejerce la 2 sobre la 1.

Para poder llevar adelante la aplicación de estas leyes al movimiento planetario, Newton tuvo que desarrollar nuevas herramientas matemáticas apropiadas. Esto condujo a la invención del cálculo diferencial e integral, que Newton descubrió, junto a Leibnitz, pero independientemente de éste, cuando todavía no había cumplido 24 años.

Newton fue capaz de dar explicaciones rigurosas al movimiento de la Tierra en el espacio y dar una explicación perfecta a las leyes de Kepler, que describían el funcionamiento del sistema solar. En otras palabras, dio una explicación al funcionamiento de casi todo el Universo conocido hasta entonces. Con este simple conjunto de ideas pudo no solo explicar las órbitas observadas de los planetas y sus satélites (lunas) sino también el movimiento de los cometas, el movimiento irregular de la Luna, el movimiento de los objetos que caen sobre la superficie terrestre, el peso los cuerpos, las mareas oceánicas. Newton hizo a la Tierra parte de un Universo entendible, un Universo elegante en su simplicidad y majestuoso en su arquitectura, un Universo que marchaba por sí mismo según la acción de las fuerzas entre sus partes y de acuerdo con leyes bien definidas. La mecánica newtoniana explicaba con tanta precisión las órbitas de los planetas, que cuando se observaron algunas irregularidades anómalas en la órbita de Urano, LeVerrier imaginó que tal vez algún planeta aun no descubierto, podría ser el responsable de esta irregularidades. De esta manera, usando la mecánica newtoniana, pudo predecir la existencia y la posición del planeta Neptuno, cuya existencia fue descubierta de este modo.

El sistema newtoniano prevaleció como un paradigma de la ciencia y la filosofía o durante los próximos 200 años. Su pronta aceptación fue asegurada de manera espectacular por la verificación del pronóstico de Edmund Halley, hecha muchos años antes, de que el cometa, que hoy lleva su nombre, reaparecería en una fecha específica, calculada a partir de las leyes de Newton. La creencia en el sistema de Newton fue reforzada continuamente por su utilidad en la ciencia y las tareas prácticas, incluyendo la exploración del espacio en el siglo XX. Las teorías de la relatividad de Albert Einstein, revolucionarias por derecho propio, no derrocaron el mundo de Newton, pero sí lo modificaron en algunos de sus aspectos más fundamentales.

El paradigma newtoniano pronto reemplazó al aristotélico que había dominado el pensamiento occidental durante casi 2000 años. Sus principios eran claros y transparentes, y sus resultados concordaban magistralmente con las observaciones.

La ciencia de Newton fue tan exitosa que su influencia se expandió más allá de la astronomía y la física. Los principios físicos y la forma matemática de Newton de derivar consecuencias a partir de un conjunto de leyes simples, se convirtieron en el modelo para todas las demás ciencias. La creencia creció a tal grado que se llegó a pensar que toda la naturaleza podía ser explicada en términos físicos y matemáticos. Consecuentemente, la naturaleza podía funcionar por sí misma, sin la ayuda o atención de los dioses. Paradójicamente, Newton veía a la física como una demostración de cómo la mano de Dios actuaba sobre el Universo. Los pensadores sociales consideraron que aun los gobiernos y las sociedades podían explicarse y entenderse como un sistema solar newtoniano, para lo cual se debían descubrir las correspondientes leyes. Aun su diseño podría seguir un modelo similar, con un equilibrio de fuerzas y acciones que asegurarían un desenvolvimiento armónico y con estabilidad a largo plazo. La búsqueda de las leyes básicas que explicaran el comportamiento de organismos vivientes y las sociedades mismas había comenzado. En cierto modo, podemos afirmar que Newton fue quien encendió la luz del Iluminismo que transformó el mundo occidental en el siglo XVIII.

Los filósofos dentro y fuera de la ciencia tuvieron problemas por la implicancia de que si cualquier cosa, desde estrellas hasta átomos, funcionaba de acuerdo con leyes mecánicas precisas, la idea humana del libre albedrío podría ser sólo una ilusión. ¿Podría toda la historia humana, desde los pensamientos hasta los cataclismos sociales, ser solamente el drama de una secuencia de acontecimientos completamente determinados? Esta influencia se refleja en los movimientos literarios como el realista y el naturalista del siglo XIX. Los pensadores sociales expusieron preguntas acerca del libre albedrío y la organización de los sistemas sociales que fueron debatidas de manera amplia en los siglos XVIII y XIX. En el siglo XX, la aparición de una incertidumbre en el comportamiento básico de los átomos alivió algunas de estas preocupaciones pero también planteó nuevas cuestiones filosóficas.



### **Teoría de la relatividad - Relación energía-materia y espacio- tiempo.**

A pesar de su éxito, la concepción newtoniana del mundo finalmente sufrió algunas revisiones fundamentales a comienzos del siglo XX. En la tercera década de su vida, 1906, Albert Einstein (1979-1955) publicó una serie de trabajos teóricos que hicieron contribuciones revolucionarias al entendimiento de la naturaleza. Uno de éstos fue la teoría especial de la relatividad, en la que Einstein consideró que el tiempo y el espacio eran dimensiones estrechamente relacionadas y dependientes del observador. Newton, por el contrario, sostenía que tanto el espacio como el

tiempo tenían un carácter absoluto e independiente del observador. Para Newton el tiempo era una cualidad externa a los objetos cuya marcha inexorable era absoluta e igual para todos. De igual manera, el espacio era algo así como un escenario donde se desarrollaba el movimiento y el devenir de la materia y el Universo, pero siendo el espacio mismo independiente de dicho Universo y su devenir.

Para comprender la teoría de la relatividad podríamos comenzar con el siguiente acertijo: Un móvil (nave espacial o una estrella) emite luz hacia adelante y hacia atrás, mientras se mueve a gran velocidad, como muestra la figura 3a:

*¿Cuál de los dos rayos de luz se mueve con mayor velocidad en relación al suelo? O dicho de otro modo, ¿los observadores en A y B miden la misma velocidad para la luz?*

Las respuestas pueden ser:

- 1) El rayo de luz delantero se mueve con mayor velocidad, B mide una velocidad mayor que A
- 2) El rayo de luz trasero se mueve con mayor velocidad. A mide una velocidad mayor que B.
- 3) Los dos rayos se mueven a igual velocidad? ¿ Los observadores A y B miden la misma velocidad para la luz.

*Según la mecánica clásica la primera de las respuestas sería la correcta, sin embargo un experimento crucial realizado en 1887 por A. Michelson y E. Morley demostró que la respuesta (3) es la correcta. Por lo tanto, este experimento sugería que la velocidad de la luz es constante sin importar quién la mide ni cómo se emitió*

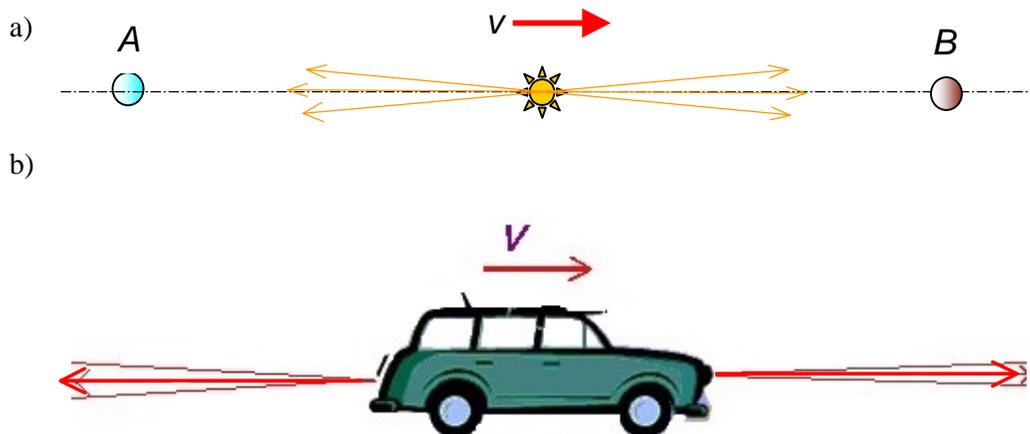


Figura 3. a) Fuente de luz (Estrella) que se mueve con velocidad  $v$  hacia la derecha respecto de dos observadores A y B. b) Un móvil (por ejemplo una nave) se mueve a gran velocidad  $V$  (con gran velocidad queremos decir una velocidad comparable a la de la luz) y emite dos rayos de luz, uno hacia adelante y otro hacia atrás. La velocidad de la luz en el vacío la designamos con  $c=3 \times 10^8$  m/s.

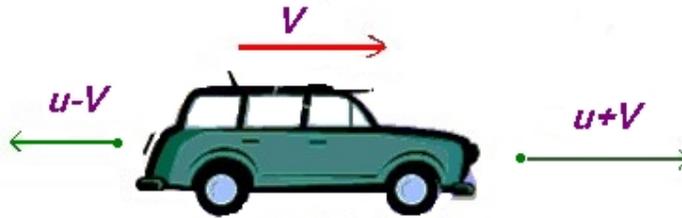


Figura 4. Un móvil se mueve una velocidad  $V$  y dispara proyectiles, que salen del arma que las eyecta con una velocidad  $u$  relativa a ella. En este caso, las velocidades de los proyectiles respecto al piso se suman algebraicamente como indica la figura.

Einstein, partiendo de esta semilla, desarrolló una de la teorías más trascendentes de toda la ciencia. Los principios básicos de la teoría de la *relatividad especial* o restringida son:

- ✓ Las leyes de la física son las mismas para todos los sistemas de referencia que se muevan con velocidad constante y en línea recta (sistemas inerciales)
- ✓ La velocidad de la luz en el vacío ( $c=3 \times 10^8$  m/s) es la misma para todos los observadores inerciales, independientemente del movimiento de la fuente o del observador.

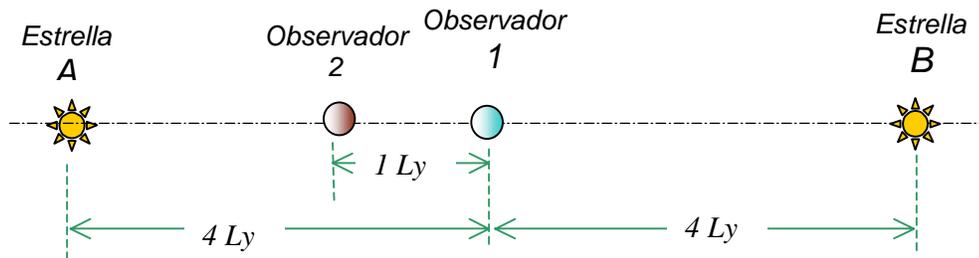


Figura 5. Las estrellas A y B, vistas por el observador 1, distantes de cada una de ellas 4 Ly (Light years = años luz), se apagan simultáneamente. Sin embargo, es claro que no será simultáneo para el observador 2, distante de 1 por 1 Ly. De hecho, el observador 2 notará que la estrella B se apaga dos años después que la A. Sucesos simultáneos en un sistema de referencia no lo son en otro sistema.

La teoría de la relatividad tuvo y tiene muchas implicaciones sorprendentes. La primera es que la velocidad de la luz  $c$ , es la mayor velocidad posible para una partícula o móvil material; nada puede ser acelerado a mayor velocidad. Otra consecuencia sorprendente es la idea que dos sucesos simultáneos en un dado sistema de referencia, no necesariamente lo son en otro sistema. Por ejemplo, si desde la Tierra observásemos que dos estrellas se apagan en el cielo en forma simultánea, esto no significa que el mismo evento (muerte de las estrellas) visto por otro observador en otro punto del espacio sea también simultáneo. Otro observador podría concluir que una de las estrellas se apagó mucho antes que la otra.

Quizás una de las consecuencias más sorprendentes de la teoría de la relatividad, es que el tiempo no transcurre igual para todos. Si uno de dos hermanos gemelos fuese un

viajante espacial, que pudiese viajar a velocidades cercanas a la luz (cosa que es totalmente imposible por ahora) y el otro hermano viviese en la Tierra, el gemelo viajero envejecería mucho más lentamente que su hermano sedentario. En los años sesenta esta predicción se pudo comprobar experimentalmente usando relojes muy precisos, uno estacionario y el otro montado en un avión que daba vuelta al mundo. Otra demostración espectacular de este fenómeno de dilatación del tiempo lo muestran los mesones  $\mu$ . Por experimentos en el laboratorio, se sabe que la vida media (tiempo entre que los mesones  $\mu$  se producen y se desintegran) es  $T \approx 1 \times 10^{-6}$  s. Si los mesones viajasen a la máxima velocidad posible (la velocidad de la luz), la máxima distancia que ellos podrían recorrer es:  $X_{max} = c.T \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s} \times 10^{-6} \text{ s} = 300 \text{ m}$ . Sabemos que los mesones  $\mu$  son producidos copiosamente en la alta atmósfera (a unos 10 km de altura) por la radiación cósmica. Clásicamente, estos mesones jamás podrían llegar a la superficie de la Tierra, ya que mucho antes se desintegrarían. Sin embargo, sabemos que dichos mesones se detectan fácilmente en la superficie, indicando claramente que sus "relojes internos" atrasan. En otras palabras para los mesones que viajan a velocidades cercanas a la de la luz, el tiempo transcurre más lentamente que para nosotros, sus coetáneos que estamos en Tierra estacionarios (los mesones  $\mu$  serían como nuestro hermano gemelo viajero, envejece más lentamente).

Otra consecuencia de la teoría especial de la relatividad es la equivalencia entre la masa y la energía. Cualquier forma de energía tiene masa, y la propia materia es una forma de energía. Esto está expresado en la famosa ecuación  $E = mc^2$ , donde  $E$  representa la energía,  $m$  la masa, y  $c$  la velocidad de la luz. Como  $c$  es un número muy grande, la transformación de una pequeña cantidad de masa libera una enorme cantidad de energía. Esto es lo que ocurre en las reacciones de fisión nuclear, que producen energía calórica en los reactores, y también en las reacciones de fusión nuclear, que producen la energía emitida por el Sol. Por ejemplo, cuando el uranio se parte en dos fragmentos (se fisiona) se libera una gran cantidad de energía  $E_{fisión}$ . Si pusiésemos todos los fragmentos en que se parte el uranio en un platillo de una balanza muy precisa, y en el otro el uranio original, notaríamos que el uranio original es más pesado que los fragmentos. De hecho encontraríamos que la diferencia de masa  $\Delta m = \text{Masa(Uranio)} - \text{Masa(todos los fragmentos)}$ , es tal que la energía liberada en el proceso de fisión  $E_{fisión} = \Delta m.c^2$ . La masa  $\Delta m$  que se transforma en energía en el proceso de fisión es sólo el *1 por mil* aproximadamente, de la masa de uranio original.



Casi una década más tarde, Einstein publicó lo que se considera el corolario de la teoría *especial* y uno de los logros más profundos de la mente humana en toda la historia: *la teoría de la relatividad general*. Ésta tiene que ver con la relación entre la gravedad, el tiempo y el espacio, en la cual la fuerza gravitacional de Newton se interpreta como una distorsión en la geometría del espacio y el tiempo. La teoría de la relatividad ha sido probada una y otra vez por pronósticos basados en ésta, y nunca han fallado hasta ahora, ni existe una teoría más poderosa en la arquitectura del Universo que la reemplace. Pero muchos físicos están buscando formas de descubrir una teoría aún más completa, una teoría que vincule la relatividad general con la teoría cuántica del comportamiento atómico.

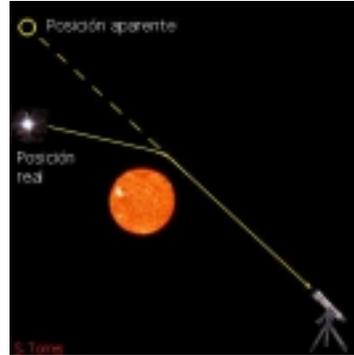
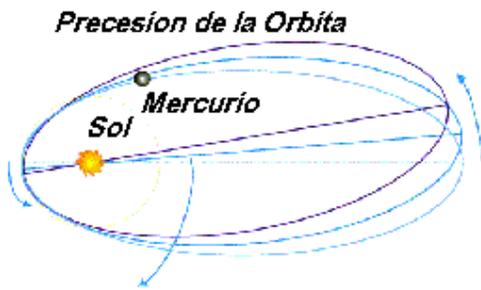


Figura 6. Dos efectos predichos por la teoría general de la relatividad y corroborados experimentalmente. Precesión de la órbita de Mercurio y deflexión de la luz al pasar por un cuerpo masivo, por ejemplo el Sol.

Algunos de los experimentos que avalan la teoría general de la relatividad son los siguientes:

Predicción	Confirmación experimental
La luz se desvía al pasar por el Sol	Fenómeno observado por <u>Arthur Eddington</u> en el eclipse solar del 29 de mayo de 1919 .
Precesión de la órbita de Mercurio	Conocida antes de que Einstein formulara la teoría. Era una de las pocas anomalías de la teoría de Newton.
Cambio en la rapidez con la que fluye el tiempo en un campo gravitacional	<u>Medido experimentalmente por J. C. Hafele y R. Keating en 1971.</u>
<u>Ondas gravitacionales.</u>	Evidencia indirecta por observaciones del sistema binario PSR 1913 realizadas por Hulse y Taylor en 1975.
<u>Agujeros negros.</u>	Varias observaciones de núcleos galácticos activos.
<u>Efecto de lente gravitacional.</u>	Observado a diario con potentes telescopios
Equivalencia entre masa gravitacional y masa inercial.	<u>Comprobado por Roll, Krotkov y Dicke en 1964</u>
Corrimiento espectral 'hacia el rojo' de la luz en un campo gravitacional.	<u>Medido por Pound y Rebka en 1960 .</u>

Para más información sobre verificaciones experimentales de la Teoría General ver:

✓ C. M. Will, “The Confrontation between General Relativity and Experiment,”

Living Rev. Relativ. **4**, 2001–2004 ~2001, on line at

<http://www.livingreviews.org/Articles/Volume4/2001-4will/>

✓ [http://www.astrocosmo.cl/relativi/relativ-05\\_05.htm](http://www.astrocosmo.cl/relativi/relativ-05_05.htm)

✓ <http://folk.uio.no/kkarlsen/docu/gr2/node4.html>

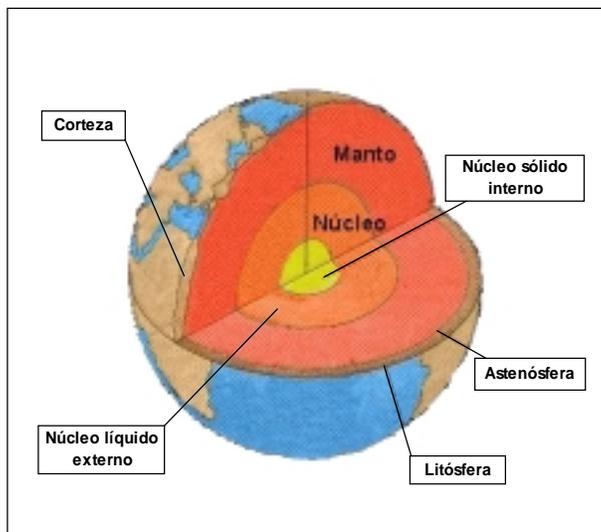
### Extensión del tiempo

Durante la mayor parte de la historia de la humanidad, la edad de la Tierra no fue un problema. Hasta el siglo XIX, la mayoría de las culturas occidentales creía que la

Tierra tenía solamente unos cuantos miles de años, y que su faz estaba fija. Las montañas, valles, océanos y ríos estuvieron siempre desde su creación instantánea. De vez en cuando, las personas especulaban sobre la posibilidad de que la superficie terrestre hubiera sido moldeada por algún tipo de procesos de cambio lento que pudieran ser observado. En ese caso, la Tierra podría ser más antigua de lo que la mayor parte de la gente creía. Profundos valles fueron formados por la erosión de los ríos, y las rocas sedimentarias se originaron de capas de sedimento producidas por la erosión. Se puede estimar que se han necesitado millones de años para producir el paisaje de ahora. Pero este argumento tuvo un progreso muy gradual hasta que el geólogo inglés Charles Lyell publicó la primera edición de su obra maestra, Principios de Geología, a inicios del siglo XIX. El éxito del libro de Lyell resultó de la abundancia de observaciones de los patrones de las capas de roca en las montañas y los de lugares donde se hallaban varios tipos de fósiles, y del razonamiento riguroso que utilizó para hacer inferencias a partir de estos datos.

“Principios de Geología” pasó por muchas ediciones y fue utilizado por varias generaciones de estudiantes de la disciplina, quienes llegaron a aceptar la filosofía de Lyell y adoptaron sus métodos de investigación y razonamiento. Además, el libro de Lyell también influyó en Charles Darwin, quien lo leyó mientras estudiaba la diversidad de las especies en sus viajes por el mundo. A medida que Darwin desarrollaba su concepto de la evolución biológica, adoptó las premisas de Lyell acerca de la edad de la Tierra y el estilo de éste de apoyar su argumento con una fuerte evidencia.

Como ocurre a menudo en la ciencia, la nueva perspectiva revolucionaria de Lyell, que abrió el pensamiento acerca del mundo, también vino a restringir el suyo propio. Lyell adoptó la idea de un cambio muy lento, que implicaba que la Tierra nunca se alteraba en forma súbita y de hecho no había cambiado en muchas de sus características generales, con ciclos perpetuos a través de secuencias de modificaciones en pequeña escala. Sin embargo, las evidencias que continuaron acumulándose, condujeron a que los científicos actuales, creyeron que tales ciclos lentos fueron solamente parte de un proceso complejo que también incluyó modificaciones bruscas o incluso cataclísmicas.



**Radio medio:** 6370 km

**Masa:**  $5.98 \times 10^{24}$  kg

**Densidad media:** 5.5 g/cm<sup>3</sup>

**Estructura:**

- ✓ **Núcleo interno:** 1.200 km, su composición se cree es de hierro y níquel sólidos
- ✓ **Núcleo externo:** 2.300 km se estima su composición en hierro y níquel fundidos
- ✓ **Manto:** 2.800 km, compuesto en su mayoría por rocas silíceas sólidas acompañadas por hierro y magnesio.
- ✓ **Corteza:** Aprox. 40 km, compuesta por rocas silíceas
- ✓ **Atmósfera:** Aprox. 1100 km, mayoritariamente compuesta por Nitrógeno (77%) y Oxígeno (21%)

Figura 7. Estructura interna de la Tierra. Gran parte de la información sobre el interior de la Tierra se obtuvo por medio del estudio de la propagación de ondas sísmicas.

Mediante técnicas de datación radiactiva, usando isótopos de uranio y otros elementos radiactivos, ha sido posible estimar la edad de la Tierra en unos 4.650 millones de años. Asimismo, muchos meteoritos datados, tienen edades similares a la de la Tierra. Se cree que la Tierra y el Sistema Solar se formaron en la misma época.

En el caso de la Tierra, se presume que después de formarse a partir del polvo cósmico y de gases mediante la atracción gravitacional, la Tierra habría sido casi homogénea y relativamente fría. Pero debido en parte a la compresión gravitacional y a la energía producida por los elementos radiactivos presentes en la Tierra, se calentó. Esto provocó que gran parte de la Tierra se fundiera. Evidencia de este proceso es la estratificación de densidades que se observa en la Tierra, ver fig.7. Los elementos pesados, hierro y níquel, se fueron hacia el centro formando su núcleo y los silicatos más ligeros se fueron a la superficie, para formar la corteza y el manto o litosfera. La erupción volcánica generó la salida de gases y vapores, también se especula que la llegada de cometas (muchos de los cuales está compuestos de gases volátiles congelados) generaron gases, algunos de los cuales fueron capturados por la Tierra para formar la atmósfera. Asimismo se cree que los vapores de agua al condensarse formaron los océanos. En realidad, aún en el presente el interior de la Tierra está caliente; la fuente de este calor es la radiactividad natural.

**Movimiento de los continentes**

Tan pronto empezaron a aparecer mapas exactos del mundo, algunas personas notaron que los continentes de África y Sudamérica parecían encajar juntos, como un rompecabezas gigante. ¿Podrían haber sido alguna vez parte de una gran masa gigante de tierra que se rompió en varias partes y después derivaron apartándose uno de otro? La

idea fue sugerida una y otra vez, pero fue rechazada por falta de evidencia. Esa especulación parecía fantástica en vista del tamaño, la masa y la rigidez de los continentes y las cuencas oceánicas y su inmovilidad aparente.

Sin embargo, a principios del siglo XX, la idea fue introducida de nuevo por el científico alemán Alfred Wegener, con evidencias: los contornos de los bordes submarinos de los continentes encajaban aún mejor que los de las superficies; las plantas, animales y fósiles en los bordes del continente eran como los que se encontraban en el borde del continente correspondiente; y lo más importante, las mediciones mostraban que Groenlandia y Europa aún hoy se están separando con lentitud. Aun así, la idea tuvo poca aceptación, y una oposición fuerte, hasta que con el desarrollo de nuevas técnicas e instrumentos se acumuló más evidencia. Se descubrieron más correspondencias en los taludes o bordes continentales y las características oceánicas por la exploración de la forma y composición del suelo del océano Atlántico, la cronología radiactiva de los continentes y sus placas, y el estudio de muestras de rocas profundas de los taludes continentales y las fallas geológicas.

Para 1960, una gran cantidad y variedad de datos fueron consistentes con la idea de que la corteza terrestre estaba constituida por unas cuantas placas inmensas que se mueven lentamente, sobre las que flotan los continentes y cuencas oceánicas. Se había probado que era incorrecto el argumento más difícil de vencer, de que la superficie de la Tierra es demasiado rígida para que los continentes se muevan. El interior caliente de la Tierra produce una capa de roca fundida debajo de las placas, las cuales son movidas por las corrientes de convección en la capa de roca fundida. En los años sesenta, la deriva continental, en la forma de una teoría de la tectónica de placas, llegó a ser aceptada ampliamente por la ciencia y proporcionó a la geología un concepto unificador poderoso.

La teoría de las placas tectónicas fue aceptada finalmente por la evidencia observacional acumulada y porque explicó todo lo que antes había sido oscuro y controversial. Fenómenos tan diversos, y al parecer sin relación, como terremotos, volcanes, la formación de sistemas montañosos y océanos, la contracción del Pacífico y la ampliación del Atlántico, e inclusive algunos cambios mayores en el clima de la Tierra, pueden verse ahora como consecuencia del movimiento de las placas de la corteza terrestre.

### **Comprensión de la naturaleza del fuego**

Durante la mayor parte de la historia humana, se pensó que el fuego era uno de los cuatro elementos básicos junto con la Tierra, el agua y el aire de los que todo estaba hecho. Se creía que al quemar materiales, éstos liberaban el fuego que ya contenían. Hasta el siglo XVIII, imperó la teoría científica de que cuando un objeto se quemaba, emitía una sustancia que liberaba peso. Esta concepción confirmaba lo que la gente veía: cuando un pedazo de madera pesado era quemado, todo lo que quedaba era un residuo de cenizas ligeras.

Antoine Lavoisier, un científico francés, realizó la mayor parte de sus descubrimientos en las dos décadas posteriores a la independencia de los Estados Unidos de América y después fue ejecutado como una víctima de la Revolución francesa.

Lavoisier llevó a cabo una serie de experimentos en los que midió con precisión todas las sustancias implicadas en la combustión, incluyendo los gases utilizados y los emitidos. Sus mediciones demostraron que el proceso de combustión era justamente lo opuesto a lo que creía la gente. Comprobó que cuando las sustancias se queman, no existe una pérdida o ganancia neta de peso. Cuando se quema la madera, por ejemplo, el carbono e hidrógeno contenidos en ésta se combinan con el oxígeno del aire para formar vapor de agua y dióxido de carbono, ambos gases invisibles que escapan al aire. El peso total de los materiales producidos por la combustión (gases y cenizas) es el mismo que el peso total de los materiales reactivos (madera y oxígeno).

Al desentrañar el misterio del fuego (una forma de combustión), Lavoisier estableció la ciencia moderna de la química. Su predecesora, la alquimia, había sido una búsqueda de métodos para transformar la materia, especialmente para convertir plomo en oro y para producir un elixir que pudiera conferir vida eterna. La investigación resultó en el acopio de algún conocimiento descriptivo acerca de materiales y procesos, pero fue incapaz de llegar a un entendimiento de la naturaleza de los materiales y de cómo interactúan.

Lavoisier inventó una ciencia totalmente nueva basada en una teoría de materiales, leyes físicas y métodos cuantitativos. La clave intelectual de la nueva ciencia fue el concepto de la conservación de la materia: la combustión y todos los demás procesos químicos consisten en una interacción de sustancias de tal forma que la masa total del material después de la reacción es exactamente la misma que antes.

Para un cambio tan radical, la aceptación de la nueva química fue relativamente rápida. Una razón fue que Lavoisier ideó un sistema para nombrar las sustancias y describir sus reacciones. Ser capaz de hacer esos enunciados explícitos fue un paso importante para que se impulsaran estudios cuantitativos e hizo posible la diseminación amplia de estudios químicos sin ambigüedad. Además, la combustión llegó a ser vista simplemente como un ejemplo de una categoría de reacciones químicas de oxidación, en la cual el oxígeno se combina con otros elementos o compuestos y libera energía.

Otra razón para la aceptación de la nueva química fue que, después de leer las publicaciones de Lavoisier, ésta encajaba bien con la teoría atómica desarrollada por el científico inglés John Dalton. Este último pulió y refinó las viejas ideas griegas de elemento, compuesto, átomo y molécula, conceptos que Lavoisier había incorporado a su sistema. Este mecanismo para desarrollar combinaciones químicas le dio aún más especificidad al sistema de principios de Lavoisier. Proveyó las bases para expresar el comportamiento químico en términos cuantitativos.

Así, por ejemplo, cuando la madera se quema, cada átomo del elemento carbono se combina con dos átomos del elemento oxígeno para formar una molécula del compuesto dióxido de carbono, liberando energía en el proceso. Sin embargo, las llamas o las temperaturas altas no necesitan estar implicadas en las reacciones oxidativas. La oxidación y el metabolismo de los azúcares en el cuerpo son ejemplos de oxidación que ocurren a temperatura ambiente.

En los tres últimos siglos, desde Lavoisier y Dalton, el sistema se ha ampliado mucho para explicar la configuración que adoptan los átomos cuando se unen entre sí y

para describir su funcionamiento interno que da cuenta de por qué se unen como lo hacen.

## **División del átomo**

Un nuevo capítulo en el entendimiento de la estructura de la materia comenzó en Francia a fines del siglo XIX. Se descubrió accidentalmente que un compuesto de uranio oscureció unas placas fotográficas envueltas, que no habían sido expuestas. Así comenzó una búsqueda científica para la explicación de esta "radiactividad". La investigadora pionera en esta nueva área fue María Curie, una científica polaca casada con el físico francés Pierre Curie. Creyendo que la radiactividad que contenían los minerales de uranio provenía de cantidades muy pequeñas de una sustancia altamente radiactiva, María Curie intentó, en una serie de pasos químicos, producir una muestra pura de la sustancia para identificarla. Su esposo puso a un lado su propia investigación para ayudar en la enorme tarea de separar una pizca elusiva de entre una cantidad inmensa de materia prima. El resultado fue el descubrimiento de dos nuevos elementos, ambos muy radiactivos, a los cuales se llamó polonio y radio.

Los esposos Curie ganaron el Premio Nóbel de física por su investigación de la radiactividad. Ellos pusieron el radio a disposición para que la comunidad científica pudiera investigar la naturaleza de la radiactividad. Después de que Pierre Curie murió, María Curie continuó su investigación y en 1911 ganó el Premio Nóbel de química, llegando a ser la primera persona en obtener ese galardón dos veces (física y química).

Mientras tanto, otros científicos con muchas más facilidades que las que María Curie tenía disponibles, fueron haciendo descubrimientos importantes acerca de la radiactividad y proponiendo nuevas teorías atrevidas acerca de ésta. Ernest Rutherford, un físico británico nacido en Nueva Zelanda, se convirtió de la noche a la mañana en el líder de este campo de rápidos avances. Él y sus colegas descubrieron que la radiactividad que ocurre naturalmente en el uranio consiste en que un átomo de éste emite una partícula, llamada alfa ( $\alpha$ ), que es el núcleo de un átomo de helio. El helio es un elemento ligero, que se usa entre otras cosas para inflar globos que flotan en el aire. Por su parte, el uranio, al perder dos protones y dos neutrones (partícula  $\alpha$ ) transmuta a un elemento más liviano. El radio era sólo un elemento de la serie radiactiva.

Este proceso de transmutación fue un descubrimiento crucial, pues reveló que los átomos no son en realidad las unidades básicas de la materia. Más bien, cada uno de ellos consiste en tres partículas distintas: un núcleo pequeño y muy masivo formado de protones y neutrones rodeado por ligeros electrones, que orbitan alrededor del núcleo, como si fuese un sistema solar en miniatura. La radiactividad cambia el núcleo, en tanto que las reacciones químicas sólo afectan a los electrones del exterior.

Pero la historia del uranio estaba lejos de terminar. Justo antes de la Segunda Guerra Mundial, varios científicos alemanes y austriacos demostraron que cuando el uranio es irradiado con neutrones, se parte en dos fragmentos que tienen aproximadamente la mitad de la masa atómica de éste. Estos físicos estuvieron poco dispuestos a aceptar lo que ahora parece la conclusión obvia: que el núcleo de uranio había sido inducido a separarse en dos núcleos más pequeños, casi iguales. Esta

conclusión pronto fue propuesta por la fisicomatemática austriaca Lise Meitner y su sobrino Otto Frisch, quienes introdujeron el término "*fisión*". Ellos notaron que si los productos de la fisión juntos tenían menos masa que el átomo original de uranio, entonces podían liberarse enormes cantidades de energía, lo cual era compatible con la teoría de la relatividad especial de Einstein.



Como vimos antes, la suma de las masas de los productos es menor que la masa del uranio. De hecho se encuentra que  $\Delta m = \text{Suma de las masas iniciales} - \text{Suma de las masas finales}$ , es mayor que cero. Según la relación de Einstein:  $\text{Energía} = \Delta m \cdot c^2$ . En la reacción de fisión, también se producen unos pocos neutrones más ( $x$  varía ente 2 y 4). Por lo tanto ellos pueden a su vez producir la fisión de otros núcleos de uranio.

Debido a estos neutrones extra generados en la fisión, es posible que ocurra una reacción en cadena, liberando continuamente grandes cantidades de energía. Durante la segunda Guerra Mundial, un equipo de científicos de los Estados Unidos de América dirigidos por el físico italiano Enrico Fermi, demostró que si se acumulaba el uranio suficiente bajo condiciones cuidadosamente controladas, en efecto, podría sostenerse una reacción en cadena. Este descubrimiento se convirtió en la base de un proyecto secreto del gobierno estadounidense, proyecto Manhattan, para desarrollar la bomba atómica. Para el final de la guerra, el poder de una descontrolada reacción de fisión había sido demostrada por la explosión de tres bombas estadounidenses: una en Álamo Gordo, NM, EE.UU. y dos sobre Japón. Desde la guerra, la fisión sigue siendo el componente principal de las armas nucleares estratégicas desarrolladas por muchos países, y ha sido utilizada de manera amplia en la liberación controlada de energía para su transformación en electricidad.

### **Aprovechamiento de la energía**

El término "revolución industrial" se refiere a un largo periodo en la historia durante el cual ocurrieron grandes cambios en los modos de producción y en cómo estaba organizada la sociedad. Este evento transformó mucha de las economías del mundo, que pasaron de una producción manual local y rural, a otra industrial, urbana y de gran escala.

Las primeras modificaciones ocurrieron en la industria textil británica en el siglo XIX. Hasta entonces, los tejidos se hacían en los hogares, utilizando esencialmente las mismas técnicas e instrumentos que se habían utilizado durante siglos. Las máquinas como todas las herramientas de la época, eran pequeñas, construidas a mano y movidas por músculos, viento o agua corriente. Este cuadro fue modificado radical e irreversiblemente por una serie de inventos para hilar y tejer y para utilizar los recursos energéticos. La maquinaria reemplazó a algunos artesanos; el carbón sustituyó a hombres y animales como fuente de poder para hacer funcionar las máquinas; y el sistema centralizado de fábricas sustituyó al disperso sistema de producción doméstico.

El motor de la revolución industrial fue la invención y el mejoramiento de la máquina de vapor. Este es un dispositivo para transformar la energía química en trabajo mecánico: se quema combustible y el calor que desprende es utilizado para convertir agua

en vapor, el cual es empleado a su vez para impulsar ruedas o palancas. Las máquinas de vapor fueron desarrolladas al principio por inventores en respuesta a la necesidad práctica de bombear agua de las inundaciones en las minas de carbón y minerales. Después de que el inventor escocés James Watt perfeccionó en gran medida la máquina de vapor, se utilizó rápidamente para impulsar máquinas en las fábricas; para mover carbón de las minas y para dar fuerza a las locomotoras, barcos y los primeros automóviles.

La revolución industrial comenzó en la Gran Bretaña por muchas razones: la inclinación británica a aplicar el conocimiento científico a asuntos prácticos; un sistema político que favoreció el desarrollo industrial; la disponibilidad de materias primas, sobre todo provenientes de muchas partes del Imperio británico; y la flota mercante más grande del mundo, la cual permitió el acceso de la Gran Bretaña a materias primas adicionales (como algodón y madera) y grandes mercados para la venta de textiles. Los británicos también habían experimentado la introducción de innovaciones en la agricultura, como arados baratos, que hacían posible que con pocos trabajadores se produjera más comida, dejando libres a otros para trabajar en las nuevas fábricas.

Las consecuencias económicas y sociales fueron profundas. El hecho que las nuevas máquinas de producción eran caras, accesibles principalmente a personas con grandes capitales, dejó fuera a la mayoría de las familias de pequeños artesanos. Los talleres fuera de las casas que atrajeron trabajadores y máquinas al mismo tiempo crecieron y se transformaron en fábricas, primero textiles y después de otras ramas. Trabajadores relativamente inexpertos pudieron manejar las nuevas máquinas, en contraste con los oficios tradicionales que requerían habilidades aprendidas durante mucho tiempo. Así, los excedentes de campesinos y niños podían ser empleados para trabajar por un salario. Así nació el proletariado.

La revolución industrial se extendió por todo el oeste de Europa y cruzó el Atlántico hasta los Estados Unidos de América y más tarde se extendió por el resto del mundo. En consecuencia, el mundo occidental del siglo XIX estuvo caracterizado por el incremento de la productividad y el desarrollo capitalista de la organización de la industria. Los cambios estuvieron acompañados por el crecimiento de grandes, complejas e interrelacionadas industrias, y el aumento rápido tanto de la población total como del movimiento de personas desde las áreas rurales a las urbanas. Por otro lado, surgió una tensión creciente entre aquellos que controlaban y obtenían ganancias de la producción y los trabajadores que trabajaban por salarios que eran apenas suficientes para mantener sus vidas. En grado considerable, las ideologías políticas principales del siglo XX surgieron de las manifestaciones económicas de la revolución industrial.

En sentido estricto, la revolución industrial se refiere a un episodio particular en la historia. Pero viéndola desde una perspectiva más amplia, está lejos de terminar. Desde su comienzo en la Gran Bretaña, la industrialización se extendió en algunas partes del mundo más rápido que en otras, y sólo ahora está alcanzando a algunas de ellas. Conforme se extiende a nuevos países, sus efectos económicos, políticos y sociales suelen ser tan drásticos como los que ocurrieron en el siglo XIX en Europa y los Estados Unidos de América, pero con las consecuencias adaptadas a las circunstancias locales y temporales.

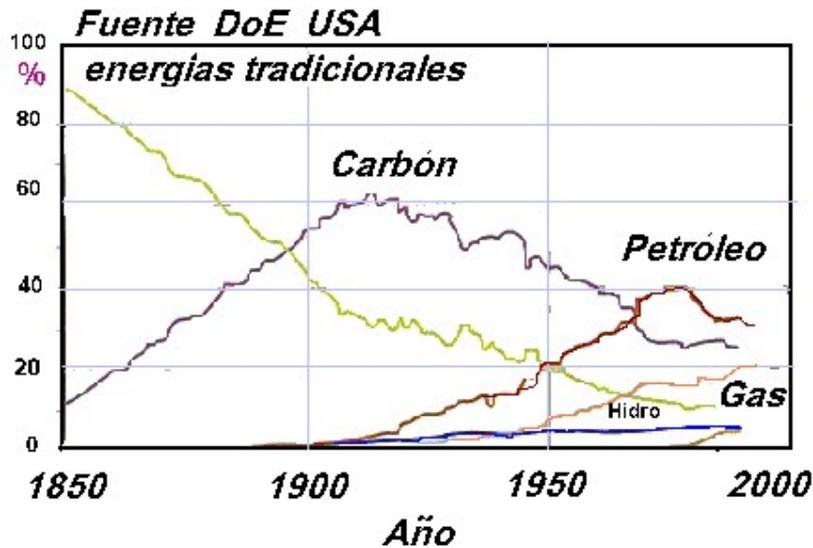


Figura 8. Evolución del uso de recursos energéticos a lo largo de la historia. Los recursos tradicionales son la madera, que era el combustible dominante antes de la revolución industrial, cuya primera fase tuvo como combustible el carbón. La segunda etapa de la revolución industrial estuvo dominada por el petróleo. En la etapa que estamos viviendo, el gas se insinúa como el combustible preferido. El gas se usa mayormente para producir electricidad, la energía de las nuevas tecnologías.

Además, la revolución se expandió más allá del poder del vapor y de la industria textil para incorporar una serie de nuevos desarrollos tecnológicos, cada uno de los cuales ha tenido gran repercusión en la forma de vida de las personas. A su vez, las tecnologías eléctrica, electrónica e informática han transformado radicalmente el transporte, las comunicaciones, la manufactura, la salud y otras tecnologías; han cambiado los patrones de trabajo y recreación; y han guiado a un conocimiento mayor de cómo funciona el mundo. El ritmo de cambio en los países recién industrializados puede ser aún más drástico porque las olas sucesivas de innovación llegan en menores lapsos. A su manera, cada una de estas continuaciones de la revolución industrial ha mostrado la inevitable y creciente interdependencia de la ciencia y la tecnología.

### Calendario de Carl Sagan

Si un mosquito, uno de esos que apenas vive un día, quisiese seguir paso a paso el desarrollo de un hombre, que al menos vive 70 años, tendría el serio inconveniente de perderse el 99.9% de la vida de ese hombre. El anhelo del mosquito sería entonces, una utopía, porque moriría mucho antes de resolver sus interrogantes acerca de como nace, vive y muere un ser humano. Si existiese un mosquito que realmente tuviese la curiosidad por estudiarnos, no lograría nada si observase a un sólo hombre. Pero si se fijara en un grupo de ellos, se daría cuenta que, afortunadamente para sus pretensiones, cada uno vive en un estado evolutivo diferente. De esta manera, observaría a un niño, un joven buen mozo, a un adulto y a un longevo anciano concluyendo que cada uno representa una etapa evolutiva diferente del hombre y que estas se suceden en forma continua desde su nacimiento hasta su muerte.

Si comparamos la existencia humana con la edad del Universo, nuestra situación no sería muy distinta a la del mosquito. Los científicos han estimado que el Universo tiene unos 15.000 millones de años, cifra que ridiculiza nuestros tres millones de años como especie inteligente. En consecuencia, no podemos sentarnos a esperar que la evolución cósmica desfile ante nuestros ojos para entender así su funcionamiento. Sin embargo, para nosotros, es de gran fortuna el hecho de que cada componente estelar (estrellas, galaxias, etc.), se encuentre en una etapa evolutiva diferente, lo cual nos ha permitido determinar con gran exactitud, como nacen, evolucionan y se extinguen. Para tener una idea más o menos clara acerca de la enorme extensión temporal del cosmos, juguemos con la imaginación y atengámonos a las sugerencias de Carl Sagan para graficar lo que ha sido de éste desde sus orígenes.

El conocido científico estadounidense, autor de varios libros y la serie televisiva Cosmos, ideó un calendario cósmico en el que la totalidad de los 15.000 millones de años atribuidos al Universo transcurren en un año terrestre. Según esta analogía, un segundo representa 500 años de nuestra historia y podemos fechar los acontecimientos más significativos de la manera siguiente.

### **Calendario**

*1 de Enero 00:00 Horas* Se produce el Big Bang, la explosión inicial del huevo cósmico que dio origen al Universo.

*1 de Enero 00:00 Horas 2 seg* Se produce la formación de los primeros átomos y la energía irradiada va llenando poco a poco el naciente espacio-tiempo.

*1 de Septiembre 00:00 Horas* Se produce la formación del Sistema Solar a partir de una nube de gas y polvo.

*25 de Septiembre 00:00 Horas* En la Tierra, hacen su aparición los primeros seres vivientes (microscópicos)

*15 de Diciembre 00:00 Horas* Se rompe el monopolio de las algas verde-azules con la llamada explosión del cámbrico, donde los seres vivos se diversificaron de forma violenta adaptándose a los ambientes más disímiles.

*24 de Diciembre 00:00 Horas* Aparecen los dinosaurios, dominadores absolutos del planeta durante 160 millones de años, hasta su extinción el 29 de diciembre.

*31 de Diciembre 23:00 Horas* Aparece el Homo sapiens.

*31 de Diciembre 23:59:00 Horas* El hombre comienza a vivir en la edad de piedra

*31 de Diciembre 23:59:52* Surge el imperio babilonio.

*31 de Diciembre 23:59:56* Estamos en los tiempos de Jesús y del emperador romano Augusto.

*31 de Diciembre 23:59:59* Cristóbal Colón descubre América.

*31 de Diciembre 24:00* Tiempo presente.

De acuerdo a este calendario, toda la historia humana transcurre en el último minuto, de la última hora, del 31 de diciembre. Esto nos da una gráfica idea de lo efímera que ha sido nuestra existencia comparada con la evolución del Universo.

Pero nuestra insignificancia va más allá: el lugar físico que ocupamos en el espacio no representa más que un átomo flotando en un océano inconmensurable.

Las distancias que nos separan de los planetas y las estrellas son tan grandes que es imposible usar las unidades de longitud terrestres como el kilómetro o la milla para medirlas en su totalidad sin enredarnos con cifras exageradamente grandes y nada

prácticas. Se utilizan en cambio unidades más grandes que nos permiten conceptualizar de manera óptima estas inmensidades. Una de ellas es el año luz, que equivale aproximadamente a 9 billones de kilómetros de longitud. Corresponde al tiempo que demora la luz para recorrer dicha distancia y es útil para localizar objetos lejanos como galaxias, cúmulos estelares y quasares. Otra unidad de medida es la unidad astronómica (U.A.) que corresponde a la distancia que separa la Tierra del Sol y equivale aproximadamente a 150 millones de kilómetros. Es utilizado frecuentemente para las mediciones dentro de nuestro sistema solar.

$$\begin{aligned}
 1Ly &= 1 \text{ Año Luz} = 9,460528 \times 10^{15} \text{ m} \\
 1U.A. &= 1 \text{ Unidad Astronómica} = 1,5 \times 10^{11} \text{ m} \\
 1pc &= 1 \text{ Parcec} = 3,085678 \times 10^{16} \text{ m} \\
 1Mpc &= 1 \text{ Mega Parcec} = 3,085678 \times 10^{22} \text{ m}
 \end{aligned}$$

Paralelamente a lo que hicimos con la edad del Universo, empleando el calendario de Sagan, construyamos un modelo a escala del sistema solar para comprender más fácilmente el significado de la vastedad del espacio exterior.

Imaginemos, por ejemplo, que un millón de kilómetros equivale a un metro de nuestra escala, es decir si todo se redujera en un factor de  $10^9$ . En estas condiciones, el sol sería una esfera de 2 metros de diámetro y la ubicaríamos en el centro de nuestro modelo. Mercurio, el planeta más cercano a él, se ubicaría a 57 metros de distancia con un diámetro de medio centímetro. Venus sería una esfera de 1,2 centímetros y orbitaría a 108 metros del Sol. Nuestro planeta se movería a 150 metros de distancia también con un diámetro de 1,2 centímetros. Marte, el más lejano de los planetas interiores, orbitaría a 228 metros del Sol y mediría algo más de 0,6 centímetros. El más grande de todos los planetas, Júpiter, deberemos ubicarlo a 778 metros de nuestro sol y sería una bola de 14,2 centímetros de diámetro. Saturno estaría a 1,4 kilómetros de distancia y mediría 12 centímetros. Urano y Neptuno medirían 4,7 y 4,4 centímetros de largo respectivamente y orbitarían en el mismo orden a 1,5 y 2,8 kilómetros del Sol. Por último Plutón mediría 0,58 centímetros y se ubicaría a 5,9 kilómetros de nuestra esfera mayor. Ahora bien, si seguimos midiendo las distancias interestelares, la estrella más cercana al Sol deberemos ubicarla a 45 mil kilómetros y nuestro modelo a escala ya no cabría sobre la Tierra (que tiene un diámetro de 12 mil kilómetros). Notemos de paso la gran cantidad de espacio entre la materia existente. De hecho la mayor parte del Universo esta vacío. Algo parecido ocurre con los átomos. Si incrementásemos el tamaño de un átomo de hidrógeno en un factor de  $10^{13}$ , el núcleo del átomo sería una esfera de unos 10 cm. El electrón, que tendrían también el mismo tamaño que el núcleo, estaría a unos 500 metros. Todo el átomo, sería una esfera de unos 500 metros. De nuevo vemos que el volumen atómico hay una gran cantidad de espacio vacío.

## **Desarrollo de la cosmología astrofísica en el siglo XX**

En el siglo XX se hicieron importantes avances en la Cosmología, de tal magnitud que transformaron esta disciplina, de una mera y apasionante especulación teológica y filosófica, en una ciencia madura, con hipótesis susceptibles de ser falseadas cuantitativamente. Tal vez los avances más destacados de la cosmología científica fueron:

- ✓ Descubrimiento de la expansión del Universo.
- ✓ Descubrimiento de la radicación cósmica de fondo (CMB).
- ✓ Desarrollo y explicación de la abundancia de los elementos que forman el Universo, a partir del modelo del "Big Bang" o "Gran Explosión".

A continuación discutiremos algunos conceptos básicos necesarios de tener en cuenta para entender las ideas centrales y los hechos empíricos en los que se basa nuestra visión actual de la Cosmología. Dado que se trata del relato de un hecho en pleno desarrollo, es por necesidad incompleto.

### ¿ Qué cosa es una onda?

Posiblemente todos hemos observado que si en un estanque tiramos una piedra o sumergimos el dedo y lo hacemos oscilar periódicamente hacia arriba y hacia abajo, se producen perturbaciones circulares en el agua que se propagan a grandes distancias. Si en el camino, digamos de 0.5 a 1 m del dedo, colocamos un pequeño objeto que flote, observaremos que al pasar la onda, el objeto flotante comienza a realizar un movimiento hacia arriba y hacia abajo, pero no se traslada (su distancia al dedo permanece igual). Lo que básicamente estamos haciendo con el dedo es enviando energía al objeto flotante y también al agua, que al moverse adquiere parte de la energía que nosotros producimos. Estas perturbaciones que se propagan en el agua son un ejemplo de una onda. Una característica de las mismas es que se trata por lo general de *una perturbación periódica que se propaga y puede transmitir energía de un punto a otro sin transporte de materia*. Nótese que lo que se propaga no es agua, de lo contrario se formaría un hueco donde tenemos el dedo. Además si el agua se trasladara, notaríamos que el objeto flotante se movería con la corriente de agua, cosa que no ocurre. El objeto solo se mueve verticalmente de abajo hacia arriba. Esta es una característica de muchas ondas. Por ejemplo, cuando hablamos, nuestras cuerdas vocales ponen a vibrar el aire, estas perturbaciones se propagan en el aire y ponen a vibrar el tímpano de otra persona que nos escucha. De modo que lo que transmitimos es sólo energía (movimiento de vibración) no materia. De otro modo se produciría una baja presión alrededor de las personas muy charlatanas, que los desvanecería rápidamente.

Otro ejemplo de ondas son la luz, las ondas de TV y radio, etc. En el caso de la luz por ejemplo, el Sol irradia luz y calor que se propagan por el espacio en forma de ondas electromagnéticas, las cuales llegan hasta nosotros. Nótese de nuevo que no hay transporte de materia desde el Sol a nosotros, pero sí de energía.

Clásicamente, podemos decir que hay dos maneras en que se propaga la energía de un sitio a otro:

- a) asociada con el transporte de materia, en forma de *partículas*, por ejemplo cuando arrojamamos una piedra, la energía que le imprimimos viaja con ella.
- b) Sin transporte de materia, en forma de *ondas*; por ejemplo una onda de radio o de sonido.

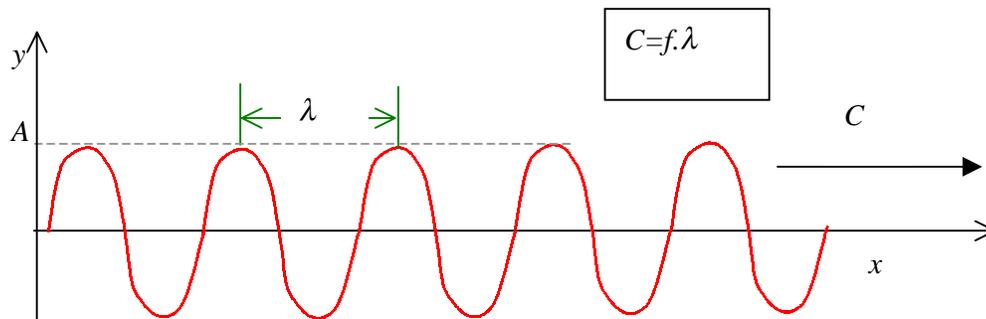
Hay algunas características de una onda que son útiles de conocer e identificar:

- ✓ **Amplitud**, ( $A$ ) en el caso de las ondas en el agua o una cuerda las vibraciones pueden ser pequeñas o grandes. La amplitud es el máximo desplazamiento que tiene una onda.
- ✓ **Frecuencia** ( $f$ ) y **período** ( $T$ ): estas dos propiedades están íntimamente relacionadas. La primera es el número de oscilaciones por segundo que la onda realiza en su paso. El periodo es el tiempo que demora cada oscilación completa. Es claro que se debe cumplir:  $f=1/T$ . En el caso del sonido, la frecuencia determina el tono o altura (si es grave o agudo) del sonido.
- ✓ **Velocidad de propagación** ( $C$ ): Es la velocidad con que viajan las perturbaciones. Por ejemplo, en el caso de las ondas de agua podemos apreciar fácilmente esta velocidad.
- ✓ **Longitud de onda**. ( $\lambda$ ): Si observamos en un dado instante una onda viajera, por ejemplo una onda que se propaga por una cuerda (ver Fig.9), la mínima distancia entre dos puntos de la onda que tiene la misma fase, por ejemplo dos máximos (o mínimos), consecutivos se denomina la longitud de onda. Una relación útil es:

$$\text{Velocidad de la onda} = \text{Frecuencia} \times \text{Longitud de onda}$$

o bien  $C = f \cdot \lambda$  (10)

Como dijimos antes, la frecuencia de las ondas sonoras (es decir el número de oscilaciones de la misma por segundo) es lo que determina el tono (agudo o grave) de un sonido. Similarmente para la luz, la frecuencia es lo que determina su color. Las frecuencias altas están asociadas al color azul-violeta y las frecuencias bajas a colores rojizos.



**Figura 9.** Diagrama esquemático de una onda viajera, en un dado instante  $t$ , cuya velocidad de propagación llamamos  $C$ .

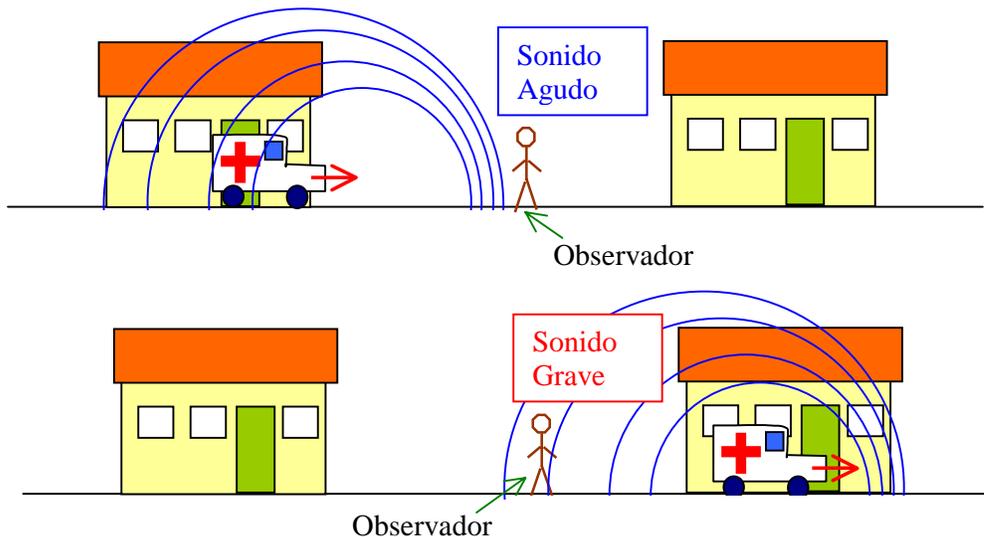
### Efecto Doppler



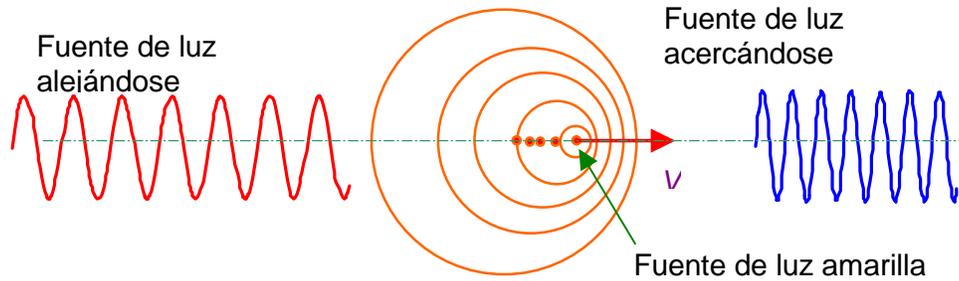
Seguramente, en la calle hemos escuchado el sonido de la sirena de una ambulancia que pasa cerca nuestro. Probablemente recordaremos como va cambiando el sonido a medida que la ambulancia se nos acerca, especialmente el cambio del tono, justamente al momento de pasarnos. Al pasar el vehículo se nota un claro cambio en altura o tonalidad del sonido, pasando de un sonido agudo a otro más grave. Si hubiésemos viajado en la ambulancia no hubiéramos observado este cambio. Cuando una fuente de sonido en

movimiento se nos acerca, apreciamos un aumento en la frecuencia. El tono nos parece más agudo. En cambio si se nos aleja, disminuye (ver figuras 10 y 11).

Cuando una fuente de sonido se acerca o aleja observador o receptor, éste recibe mayor o menor cantidad de ondas por unidad de tiempo según el sentido de desplazamiento de la fuente emisora. Si hacemos una analogía, se vislumbrará más fácilmente lo que ocurre: supongamos que un observador se encuentra parado a un costado de la vía férrea esperando ver pasar el tren. Y supongamos también que el tren se acerca al observador sonando su bocina en forma ininterrumpida. Ver figura 10. A medida que se acerca, el observador captará que el sonido se hace cada vez más agudo, hasta el momento en que el tren pasa junto a él. Desde ese instante, el sonido irá bajando paulatinamente de tono, tornándose más grave, hasta hacerse inaudible por la distancia. Esto se explica porque las ondas de sonido viajan en la misma dirección del tren cuando éste se aproxima, debido a lo cual, se comprimen y el receptor recibe más de ellas por unidad de tiempo. Al alejarse el tren, las ondas viajan en sentido contrario a la fuente emisora lo cual produce su dilatación, recibiendo el espectador menos ondas por unidad de tiempo. Ello produce que el sonido sea más grave. Como este fenómeno afecta a todo tipo de ondas.



**Figura 10.** Una persona en la calle oye el sonido de una sirena cuando pasa una ambulancia, Lo mismo ocurre si la persona está en una estación viendo pasar un tren con su bocina sonando. El sonido es más agudo cuando la ambulancia (o el tren) se acerca y más grave cuando se aleja. En cambio el conductor de la ambulancia (o del tren) no nota ningún cambio. Para él el sonido de la sirena es siempre igual. En esta figura los círculos, centrados en las posiciones instantáneas de la fuente (ambulancia), indican la posición de los distintos frentes de onda vistos por un observador en reposo.



**Figura 11.** Aquí vemos una fuente de luz amarilla moviéndose a velocidades cercanas a la luz hacia la derecha. Los observadores estacionarios (en el sistema de referencia elegido) a la izquierda, ven la fuente alejándose y su color (frecuencia) se enrojece (disminuye la frecuencia). En cambio los observadores de la derecha, observan que la fuente se acerca y su color se corre hacia el azul (aumenta la frecuencia).

Johann Doppler (1803-1853) estudió el fenómeno de la variación del tono de un sonido cuando la fuente se mueve. Por este motivo, este fenómeno recibe el nombre de *efecto Doppler*. Este fenómeno ocurre con todas las ondas, incluyendo las ondas electromagnéticas, como lo son la luz, las ondas de radio, la TV, etc. Si una fuente de luz amarilla en movimiento (a velocidades muy grandes) se nos acerca observamos un aumento de la frecuencia (los colores se vuelven más azules) y si se nos aleja, el color de la fuente se vuelve más rojizo.

En resumen:

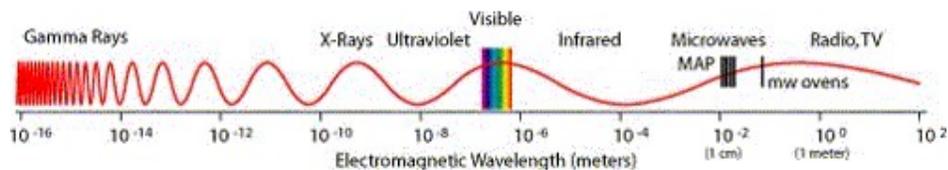
- ✓ Cuando una fuente se acerca la frecuencia emitida aumenta (sonido más agudo, color más azul)
- ✓ Cuando una fuente se aleja, la frecuencia emitida disminuye (sonido más grave, color más rojo)

$$\text{Variación de la frecuencia} = \Delta \text{frecuencia} = k \cdot \text{velocidad}$$

O bien

$$\Delta f = k \cdot v \quad (11)$$

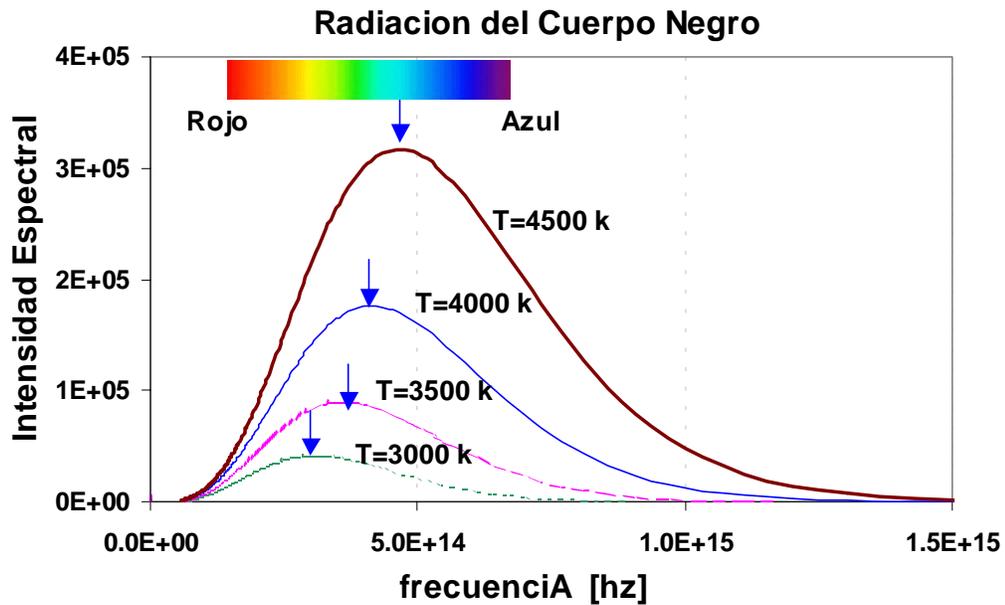
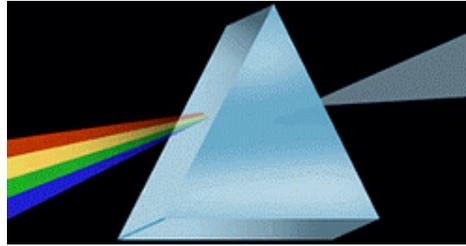
Nótese que lo que varía con la velocidad es la *frecuencia* (o equivalentemente la *longitud de onda*), no la intensidad o la velocidad de la onda.



**Figura 12.** Espectro de la radiación electromagnética. En el eje horizontal están representadas las longitudes de onda ( $\lambda$ ) de la radiación. La frecuencia aumenta hacia la izquierda. A muy cortas longitudes de onda tenemos los rayos gamma, por otro lado para grandes longitudes de onda tenemos las ondas de radio. La región visible está en el centro, siendo el color rojo el de mayor longitud de onda y el azul-violeta el de menor longitud de onda.

## Radiación del cuerpo negro

Todo objeto caliente emite radiación electromagnética. Cuando encendemos una estufa eléctrica, de esas que tienen un tubo de cuarzo, notamos que a medida que se calienta, va irradiando más calor y cada vez más copiosamente; también su color va cambiando. Al principio sentimos el calor pero el tubo no brilla. Al aumentar más la temperatura el tubo se pone rojo incandescente y si se calienta más aún, el mismo se parece a una lámpara incandescente, la luz irradiada se vuelve similar a la luz de Sol (luz blanca). Esta es una característica de todos los objetos: a medida que aumenta la temperatura la cantidad de energía radiada aumenta fuertemente y su color va cambiando.



**Figura 13.** Espectro de la radiación electromagnética de un cuerpo negro a distintas temperaturas. Las flechas indican la posición del máximo de radiación a cada temperatura. Arriba se muestra como al pasar un haz de luz blanca, por ejemplo proveniente de una fuente incandescente, al pasar por un prisma se descompone en los distintos colores del arco iris.

En la Figura 13 se presentan los espectros de radiación de un cuerpo (negro) a distintas temperatura absoluta (la temperatura absoluta es la temperatura en grados centígrado más 273, sus unidades son grados Kelvin, o sea  $T_{absoluto} [K] = T [^{\circ}C] + 273.15$ ). Si la radiación de un cuerpo caliente, llamado comúnmente “cuerpo negro”, se hace pasar por un prisma, la misma se descompone en distintas frecuencias (colores). Vemos que a medida que aumenta la temperatura, el área de las curvas de la Figura 13 aumenta

rápidamente (esto es la energía total emitida por unidad de tiempo). Además notamos que el máximo de la curva, representado por las flechas verticales, se va corriendo a frecuencias mayores a medida que aumenta la temperatura. Se puede escribir una relación entre la frecuencia de máxima radiación para cada temperatura. Esta relación se llama ley de Wien:

$$f_{Maximo} [Hz] = 1.038 \times 10^{11} \cdot T [K]$$

La ley de Wien afirma que el máximo de la intensidad de la radiación térmica emitida por un cuerpo negro ideal se desplaza, con el aumento de la temperatura, hacia las frecuencias más grandes, o equivalentemente a regiones de longitudes de onda más cortas. Esta ley nos permite entender por qué un cuerpo al calentarlo, primero se pone rojizo y a medida que se calienta más se va volviendo más azul, pasando por un color blanco incandescente. Esta propiedad de los cuerpos calientes, es lo que posibilita la visión de mamíferos en la oscuridad. Dado que los mamíferos mantenemos una temperatura muy estable, de 37°C (= 310 K), nuestro espectro de radiación tiene un máximo en el infrarrojo. Si usamos un visor sensible a esta radiación podremos ver la silueta de un mamífero en la oscuridad. Estas propiedades de la radiación de un cuerpo caliente también se aplican en termografía, que es una técnica que permite tomar una foto que muestra la distribución de las temperaturas de una persona. Esta técnica permite detectar, por ejemplo un cáncer, ya que los tejidos cancerosos tienen una temperatura levemente mayor a los sanos.

La ley de Wien se utiliza también para determinar las temperaturas de las estrellas, a partir de los análisis de su radiación. En general, estudiando el espectro de emisión de un cuerpo podemos determinar su temperatura.

### **Variación de la temperatura en la expansión de un gas**

Posiblemente todos hemos experimentado el hecho de que cuando inflamos la rueda de una bicicleta con un inflador manual, el extremo del mismo, por donde sale el aire, se calienta. Este fenómeno ocurre toda vez que se comprime un gas sin que entre o salga energía del sistema (proceso adiabático). Por ejemplo, en el caso del inflador, la compresión ocurre rápidamente y no da tiempo para que se intercambie energía con el medio. Este proceso es reversible, es decir si se expande el gas, el mismo se enfría. De hecho, un refrigerador funciona gracias a este principio. Un gas comprimido por el compresor de la heladera, se descomprime rápidamente en la región del congelador, enfriándose y tomando calor del medio. Este mismo principio opera en gran escala en el Universo. A medida que el Universo se expande, el mismo se va enfriando. Podemos determinar la temperatura media del Universo, midiendo la radiación electromagnética de fondo. En las secciones que siguen investigaremos este efecto en más detalle.

### **Abundancia de los elementos en el Universo Nucleosíntesis**

Una de las teorías cosmológicas más antiguas es la del Universo estático e infinito. Una objeción importante a un Universo eterno es la existencia de radioactividad natural. La radioactividad natural es la causa del calentamiento de la Tierra y la fuente de energía de la actividad volcánica y movimientos geológicos terrestres. Su existencia se

manifiesta, también, en la presencia de Helio en el interior de la Tierra. Este gas se escapa de la atmósfera ya que su velocidad, debida a la agitación térmica, es mayor que la velocidad de escape de la Tierra. El origen del Helio en el interior de la Tierra es consecuencia del decaimiento alfa (núcleos de He) de los núcleos pertenecientes a las cadenas radiactivas naturales (Uranio y Torio). Cada elemento radiactivo tiene un tiempo característico, llamado su vida media ( $T_{1/2}$ ). Si tenemos una cantidad de Uranio 238 (digamos 1 kg), pasado un tiempo igual a  $T_{1/2}$ , solo tendremos la mitad del Uranio original, el resto se habrá desintegrado (se transforma en otro elemento). Si el Universo, y por lo tanto los elementos que lo forman, siempre hubiesen existido, los elementos radiactivos ya habrían decaído totalmente y no existiría la radiactividad natural, ni volcanes, ni Tierra caliente, etc. La única posibilidad de observar fenómenos radiactivos sería a través de fuentes artificiales. Por lo tanto, la mera observación de la radiación natural, radiactividad no generada por el hombre, es una evidencia de que los elementos no siempre existieron.

Hay sustancias naturales (radioactivas) que no son estables. Si es que están en la Tierra, lo están desde su creación, ya que no hay mecanismos plausibles que puedan producirlas en la Tierra. En otras palabras, las sustancias radiactivas naturales no son eternas. Por ejemplo el uranio 235 ( $^{235}\text{U}$ ) tiene una vida media de  $T_{1/2} = 0.7 \times 10^9$  años, con abundancia en el uranio natural de 0.72%. Similarmente, el uranio 238 ( $^{238}\text{U}$ ) tiene una vida media de  $T_{1/2} = 4.47 \times 10^9$  años, con abundancia en el uranio natural del 99.3%. Para el Torio 232 ( $^{232}\text{Th}$ ) la vida media es  $T_{1/2} = 1.4 \times 10^{10}$  años.

Prácticamente todos los isótopos radiactivos que existen en la Tierra tienen vidas medias mayores que  $10^9$  ó  $10^{10}$  años, por lo tanto vemos que algo singular debe haber ocurrido en este tiempo:  $T_{\text{critico}} = 10^9 - 10^{10}$  años.

### Paradoja de Olber

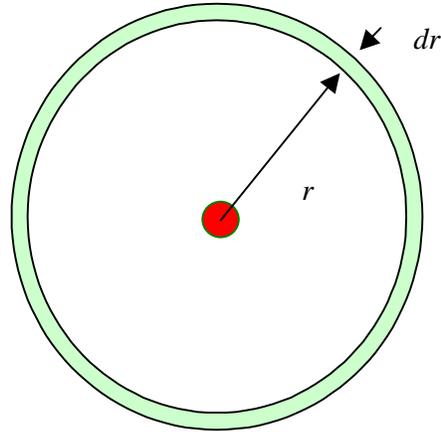
Otra objeción a la teoría del Universo estático e infinito es la existencia de la noche, objeción conocida como paradoja de Olber. Si el Universo fuese estático (no se expande ni colapsa) también debería ser infinito. De este modo la fuerza gravitatoria sobre cada región del Universo sería en promedio nula y esto prevendría el colapso gravitatorio. También se pensaba que el Universo era eterno, o sea que siempre habría existido como ahora, incluyendo los elementos que lo forman. Actualmente sabemos que estas teorías tienen varias objeciones serias. Si el Universo fuese eterno (siempre existió) e infinito, todas las visuales trazadas desde la Tierra eventualmente encontrarían una estrella, de modo que el cielo de noche debería ser tan brillante como la superficie del Sol. ¡Sin embargo sabemos que la noche existe!

Otro modo de entender esta paradoja consiste en calcular la intensidad de radiación que llega a la superficie de la Tierra proveniente de las estrellas; recordemos que la intensidad de radiación es la energía radiante que llega a la unidad de área por unidad de tiempo. Para ello supondremos que el Universo es infinito y con una densidad  $n$  de estrellas por unidad de volumen y que una estrella tiene una potencia de emisión promedio de  $\langle P \rangle$ . La intensidad  $dI$  que llega desde todas las estrellas que están en la capa esférica de radio  $r$  y espesor  $dr$ , teniendo a la Tierra en el centro de dicha esfera, ver figura 14, será:

$$dI = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot n \cdot \frac{\langle P \rangle}{r^2} \cdot dr \quad (12)$$

Si integramos esta intensidad para todas las capas esféricas desde el mínimo radio  $r_{min}$  (asociado a la distancia de las estrellas más cercanas) hasta el radio máximo  $r_{max}$ , obtenemos:

$$I = 4 \cdot \pi \cdot n \cdot \langle P \rangle \cdot (r_{max} - r_{min}) \quad (13)$$



**Figura 14.** Cascarón esférico de radio  $r$  y espesor  $dr$  centrado en un observador ubicado en la Tierra, que está en el centro.

*Las noches son oscuras porque el Universo no es eterno!*

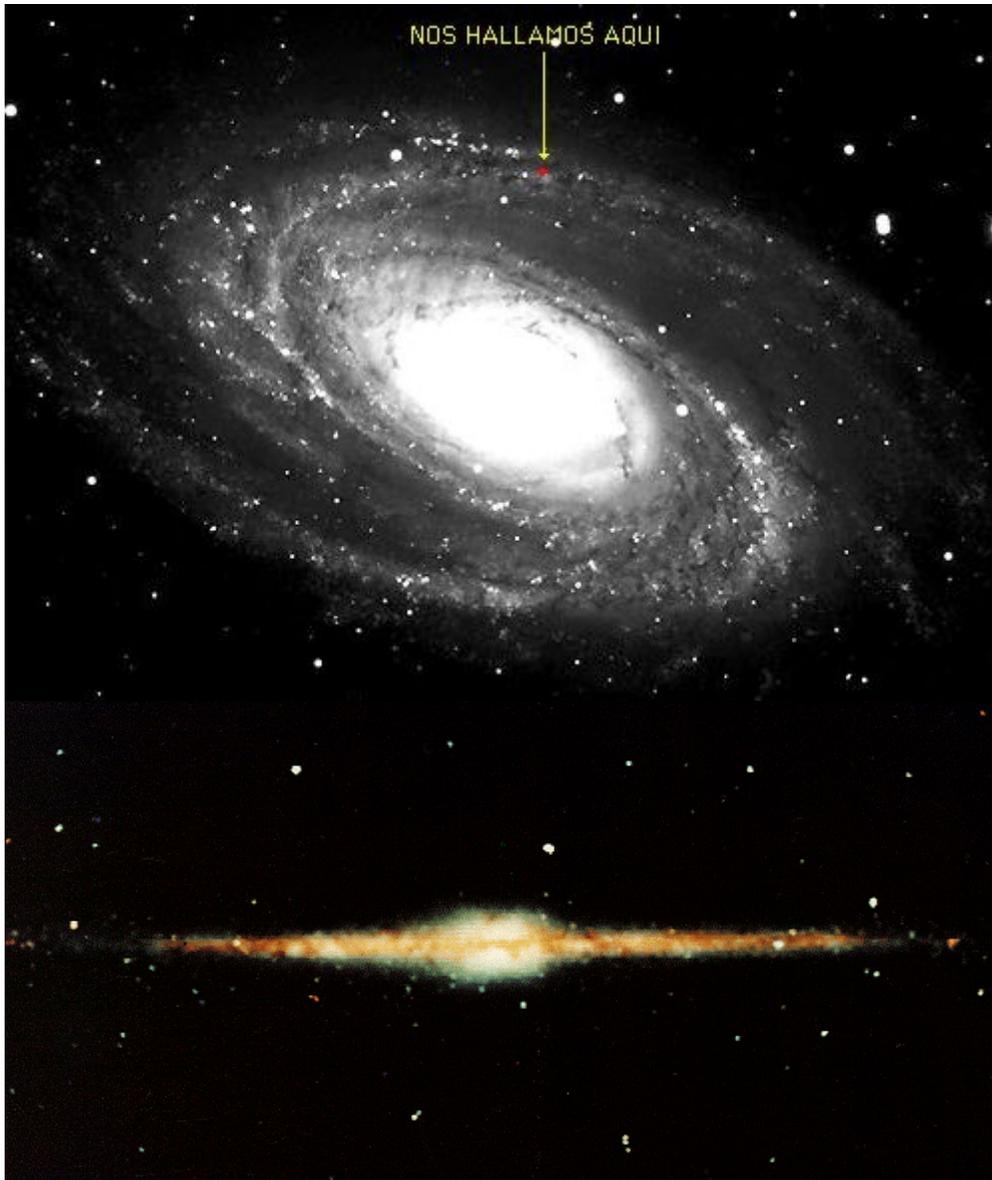
Si suponemos que el Universo es infinito y siempre existió, debemos tomar  $r_{max} = \infty$ , con lo cual  $I \rightarrow \infty$ , que es justamente la paradoja de Olber. Nótese que esta divergencia subsiste para cualquier valor de  $n$  y  $\langle P \rangle$ . El origen de esta divergencia está asociada a  $r_{max} \rightarrow \infty$ . ¿Cómo podría solucionarse este problema?. Vemos que si el Universo fuese finito en tiempo, es decir si existiera un “horizonte” en tiempo  $T_{horiz}$ , tal que las estrellas que “vemos” son sólo aquellas que están dentro de la esfera de radio  $R_{horiz} = c \cdot T_{horiz}$  ( $c$  es la velocidad de la luz), entonces en la expresión (13) debemos asociar  $r_{max} = R_{horiz}$  y la divergencia quedaría salvada. Es interesante notar que la posible absorción que podrían producir partículas entre la Tierra y las estrellas, que forman el medio interestelar, no resuelve el problema de la divergencia en la intensidad. En un Universo eterno, este material interestelar estaría en equilibrio térmico con la radiación que recibe y emitiría tanto como absorbe. De este modo, este material interestelar sería tan brillante como las estrellas, lo cual hace que la absorción sea irrelevante y el problema de la divergencia aun subsistiría.

## El Principio Cosmológico

Este principio se basa en la idea de que en todo el Universo valen las mismas leyes de la física y además que el mismo es isótropo (igual en todas las direcciones) y

homogéneo (igual en todas partes) en promedio para grandes escalas de distancia. El “Principio Cosmológico” fue formulado por Einstein alrededor de 1915, cuando todavía los astrónomos consideraban al sistema de estrellas de la Vía Láctea como todo el Universo conocido. En ese tiempo, esta parecía una hipótesis demasiado atrevida. Sin embargo, la idea de Einstein tuvo una rápida aceptación. En los años 20, Hubble había descubierto un gran número de nebulosas o galaxias espirales de distintas luminosidades, como cabría esperar si su distribución fuera aleatoria en el espacio. El trabajo de Hubble revelaba que las galaxias espirales estaban distribuidas en el espacio de una forma estadísticamente uniforme, de acuerdo con el principio cosmológico. Esta hipótesis de homogeneidad, además simplificaba en gran medida el problema de resolver las ecuaciones de la Relatividad General.

Uno podría preguntarse si existe alguna evidencia observacional más fuerte de que el Universo es homogéneo a gran escala. La respuesta es afirmativa, ya que disponemos de varios mapas reconstruidos a partir de las observaciones que indican que las galaxias se presentan distribuidas muy uniformemente, como cabría esperar si el principio cosmológico fuese válido. De todos modos, es importante destacar, que a pequeñas escalas, por ejemplo dentro del sistema solar o aun dentro de la Vía Láctea, el principio cosmológico no es válido. Sólo a grandes distancias, cuando nos referimos a la distribución de Galaxias o grupos de Galaxias podemos suponer que este principio de homogeneidad es adecuado.



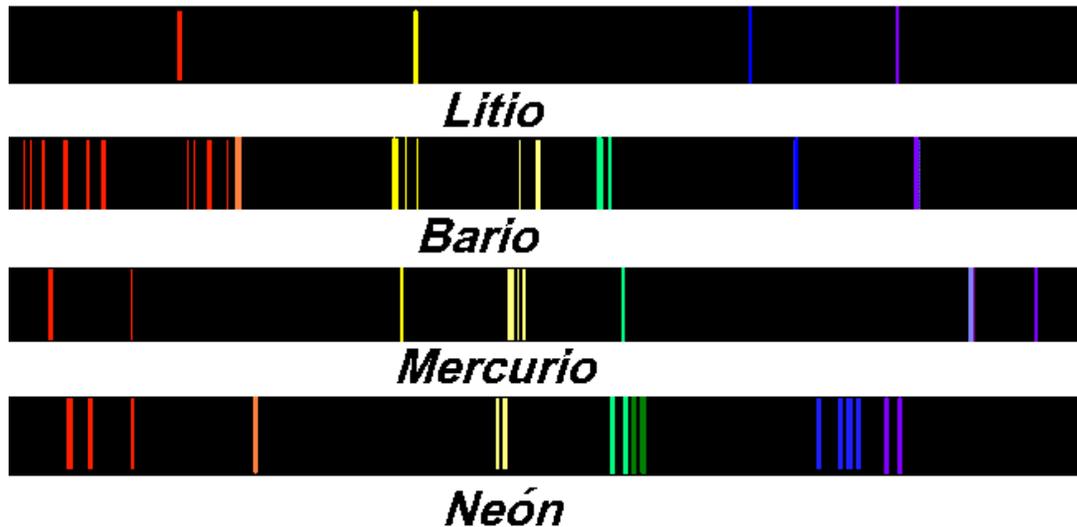
**Figura 15.** Dos vista de la Vía Láctea. La superior es una foto de una Galaxia que se parece a la nuestra. La vista inferior es una imagen reconstruida a través de los datos adquiridos por el Satélite COBE (NASA), en el infrarrojo próximo, desde una perspectiva complementaria a la superior. El diámetro de la Vía Láctea se estima en unos 100.000 años luz (Ly) y su espesor, en la zona central sería de unos 3300 Ly. En el fondo se notan otras galaxias vecinas.



### El Universo en expansión

Edwin Powell Hubble nació en Marshfield, Missouri, en 1889. Obtuvo una beca Rhodes de la universidad de Oxford y fue un atleta consumado. Estudió Derecho y durante algún tiempo ejerció como abogado en Kentucky, aunque pronto dejó esta profesión. Su pasión era la astronomía. A pesar de su poco ortodoxa formación académica logró una

posición en el observatorio Mount Wilson de California. Donde estaba el mayor telescopio del mundo con un espejo de 2.5 m de diámetro. Hubble era un astrónomo muy meticuroso que normalmente se abstenía de hacer afirmaciones que no estuviesen bien apoyadas en evidencias. Hubble fue un pionero en lo que podríamos llamar la astronomía extragaláctica. Estudió las propiedades *variables cefeidas*<sup>1</sup>, estrellas variables que nos permiten conocer las distancias a las que ellas se encuentran de nosotros. Esta técnica permitió conocer como se distribuían las Galaxias en el espacio. Pero su mayor contribución fue sin duda el descubrimiento de la expansión del Universo, uno de los descubrimientos más importantes de toda la historia de la humanidad.



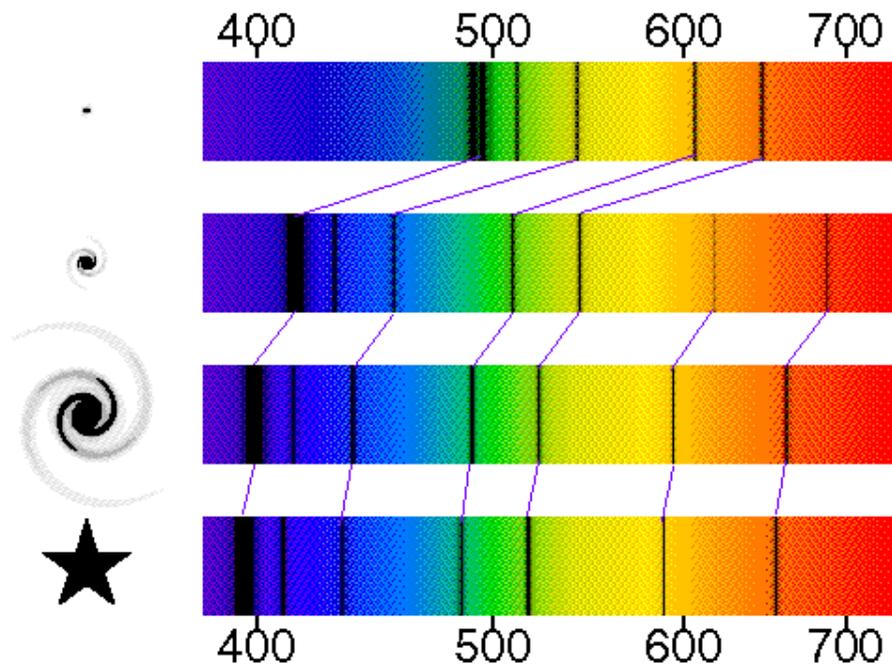
**Figura 16. Espectros característicos de distintos elementos.** Si una sal de una sustancia, se coloca en la llama de un mechero, y se hace pasar la luz que se produce por un prisma, se observa un espectro como los de la figura. Si se tratase de un cuerpo incandescente se observaría un espectro continuo como el de la Fig. 13, en cambio en este caso se observan sólo algunas líneas discretas. Cada elemento químico tiene un espectro característico, es decir, una distribución determinada de la radiación electromagnética. Ese espectro particular permite identificar los elementos. Los espectros son como una especie de “código de barras” que la naturaleza puso en cada uno de los elementos. Esta técnica de identificación se llama espectroscopia. Los espectros de emisión, como los ejemplos que se muestran, están formados por varias líneas de longitudes de onda bien determinadas, separadas por zonas oscuras. Con esta técnica es posible conocer los elementos presentes en el Sol y otras estrellas.

<sup>1</sup> La cefeidas son estrellas pulsantes, su importancia radica en que presentan una relación definida entre su luminosidad media (o sea la potencia que irradian) y el periodo de pulsación. Esta relación fue descubierta en 1912 por la astrónoma estadounidense Henrietta S. Leavitt y se conoce como relación periodo-luminosidad. Leavitt encontró que la luminosidad absoluta o potencia de una cefeida aumenta de manera proporcional a su periodo de pulsación. Así, los astrónomos pueden determinar la luminosidad intrínseca o absoluta de una cefeida midiendo el periodo de pulsación. La luminosidad aparente de una estrella en el cielo (la intensidad de la misma que se observa con un telescopio) depende además de su distancia a la Tierra. Comparando esta luminosidad aparente con su luminosidad intrínseca se puede determinar la distancia a la que se encuentra. De este modo, las cefeidas pueden utilizarse como indicadores de distancias tanto dentro como fuera de la Vía Láctea. Este efecto es equivalente a observar lámparas de una misma potencia, distribuidas a distintas distancias. Claramente, las más lejanas se verán menos brillantes que las más cercanas. De este modo el brillo aparente nos permitiría conocer sus distancias.

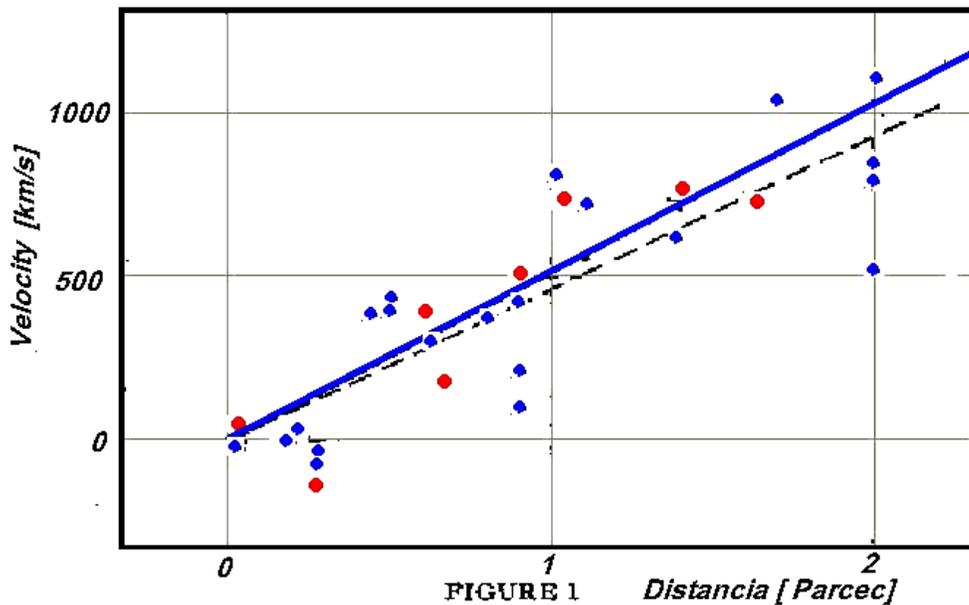
En 1909, el astrónomo Percival Lowell (1855-1916) –más conocido por su extravagante interpretación de aparentes líneas que surcan la superficie de Marte como canales de agua construidos por una supuesta civilización marciana– instruyó a Slipher para que hiciese observaciones del espectro de las nebulosas espirales. Slipher constató el hecho de que la mayoría de las galaxias presentaban desplazamientos al rojo en sus espectros. Y aunque su trabajo fue muy bien recibido por la comunidad de astrónomos, nadie podía dar una interpretación del significado de estas observaciones.

En 1929 Hubble presentó sus investigaciones sobre los desplazamientos al rojo de los espectros de unas 46 nebulosas extragalácticas, con unos 24 datos muy bien medidos. Al graficar las velocidades de alejamiento de las 24 nebulosas (obtenidas de los enrojecimientos de sus espectros) en función de sus distancias, (ver Fig. 18) encontró una sugestiva relación lineal. Es decir:

$$V [km/s] = H \cdot d [\text{parsec}] \quad (14)$$



**Figura 17.** Espectro de H proveniente de distintas fuentes lejanas. El espectro inferior corresponde al de una estrella cercana. Siguiendo hacia arriba, tenemos los espectros de galaxias cada vez más lejanas. A medida que se aleja la galaxia, su tamaño aparente (indicado a la izquierda) disminuyen. Concomitantemente, las líneas oscuras se corren hacia la derecha (hacia el rojo).



**Figura 18.** Representación de la velocidad en función de la distancia con los datos originales Hubble de 1929. Las distancias están medidas en la unidad  $Mpc = \text{mega parsecs} = 3.26 \cdot 10^6 \text{ Ly} = 3.086 \cdot 10^{22} \text{ m}$ . De estos datos se obtiene  $H_0 = 550 \text{ km/s/Mpc}$ .

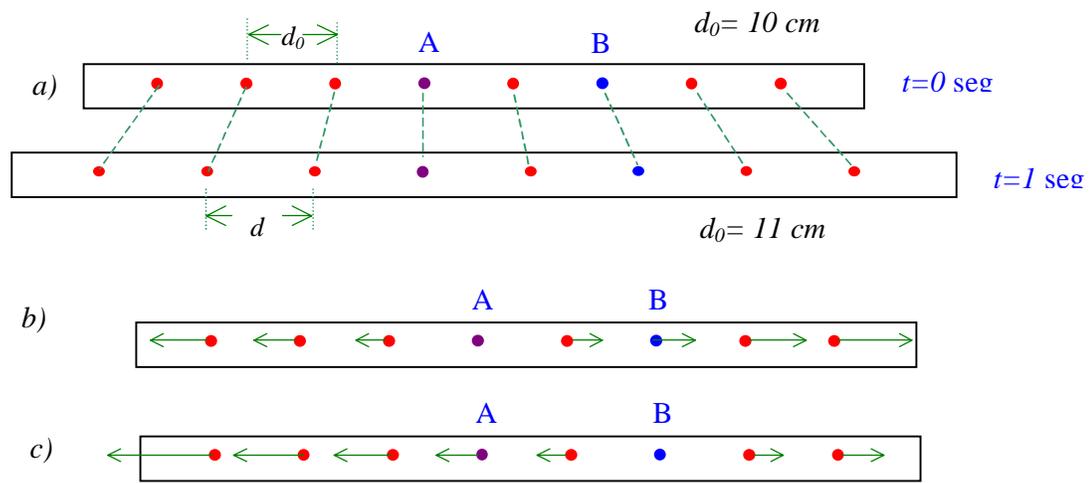
Esta relación, conocida como la ley de Hubble, fue la primera ley verdaderamente cosmológica y fue rápidamente aceptada en la comunidad astronómica por varias razones.

- ✓ El desplazamiento al rojo de las nebulosas había sido reportado por varios astrónomos antes que Hubble, de manera que la comunidad estaba preparada y expectante.
- ✓ Hubble tenía el mejor telescopio del momento, Mount Wilson. Sus estudios de las distancia a las nebulosas era conocido y su meticulosa determinación de distancias extragalácticas, hacía que sus resultados fueran confiables.
- ✓ La ley fue inmediatamente corroborada también por Willem de Sitter, otro prestigioso astrónomo, que constató independientemente las observaciones de Hubble.
- ✓ Para entonces comenzaba a surgir consenso en la comunidad científica que el Universo no era estático y se empezaba a aceptar el modelo del Universo en expansión de de Sitter.

Einstein fue uno de los que apoyó entusiastamente el modelo del Universo en expansión. Con esta hipótesis, sus ecuaciones de la Relatividad General recuperaban una simplicidad que no se podía lograr con un Universo estático. Einstein y Hubble fueron dos notables científicos, el primero un teórico y el segundo un agudo observador, en cuyo dialogo se forjó la cosmología científica, cuyas consecuencias han revolucionado la comprensión del Universo.

Sin embargo, Hubble no se sentía totalmente satisfecho con la relación encontrada. En el último párrafo de su artículo de 1929 escribió que la relación lineal era "una primera

aproximación que representa un alcance restringido en distancia", de modo que él sospechaba que podía haber una relación más complicada, de la cual su ley era una primera aproximación.



**Figura 19.** Modelo unidimensional de la Ley de Hubble. Imaginemos tener un espacio unidimensional, representado por un elástico como se muestra en la figura a). Aquí cada punto indica una “galaxia hipotética” uniformemente distribuidas, a una distancia  $d_0$  ( $=10\text{ cm}$ ) una de otra al instante  $t=0$ . Si la cinta se estira, digamos que un segundo después la distancia de las galaxias más próximas es ahora de  $d=11\text{ cm}$ . El observador de la galaxia A, verá que las galaxias más próximas (las que estaban a  $10\text{ cm}$ ) se alejan de él a  $v=1\text{ cm/s}$ . Las galaxias que estaban a  $20\text{ cm}$  se alejan de él a  $v=2\text{ cm/s}$  y así sucesivamente. Es decir él concluye que las galaxias se alejan de él siguiendo una ley de Hubble ( $v=H \cdot d$ ), representado esquemáticamente como en la cinta b). Otro observador, como el B que vive en otra galaxia, digamos la B, al describir lo que le observa, también concluirá que las galaxias se alejan de él siguiendo la Ley de Hubble, como se muestra en c). Por lo tanto vemos que todos los habitantes de este Universo concluirán que las galaxias se alejan de cada uno de ellos siguiendo una ley del tipo Hubble como si cada uno fuese el centro del Universo, aunque claramente ninguno lo es o equivalentemente todos los son. La moraleja de este ejemplo, es que la ley de Hubble está estrechamente vinculada y es consistente con el principio cosmológico.

En 1931, extendió su estudio hasta objetos situados (según su calibración de distancias) a 32 Mpc, un enorme salto en distancias si se contrasta con el objeto más distante del esquema de 1929, situado a solo 2 Mpc. Había además muchos más puntos en el diagrama de 1931 y la correlación lineal entre desplazamiento al rojo y distancia parecía ser incluso más nítida que antes. El colaborador de Hubble en el artículo de 1931, Milton Lasell Humason (1891-1972), ex mulero y ordenanza del Observatorio Mt. Wilson, interpretó el desplazamiento al rojo como debido al efecto Doppler por la velocidad de recesión de las galaxias. Sin embargo muchos astrónomos se mostraron incrédulos ante las magnitudes de tan enormes velocidades, de hasta 20000 km/s. El valor de la constante de Hubble ( $H_0 \sim 550\text{ km/s/Mpc}$ ) deducida parecía implicar, si uno extrapola la expansión presente hacia atrás en el tiempo despreciando cualquier tipo de aceleración en la expansión, que hubo un tiempo, unos dos mil millones de años atrás, en que toda la materia del Universo se hallaba empaquetada mucho más densamente que en la

actualidad. De ahí sólo distaba un pequeño paso para hablar de la edad del Universo. Pero alrededor de 1930 ya era conocida la técnica de datación por desintegración radiactiva y Ernest Rutherford (1871-1937) había establecido, de su estudio de la desintegración de los isótopos del uranio, una edad mínima aproximada de la Tierra de unos tres mil millones de años. Los estudios de la evolución estelar de aquella época también estimaban una edad de la Galaxia que era mucho mayor que el valor deducido a partir de la constante de Hubble. La polémica estaba servida: ¿Cómo podría ser el Universo más joven que los objetos que contiene?. Esto abrió una crisis en la cosmología, “ the age crisis”, que desde entonces ha sido recurrente.

Esta polémica referida a la edad del Universo se produjo nuevamente en los años 90. La ley de Hubble ha sido confirmada por nuevos y mejores datos, pero el valor definitivo de la constante permanece como un problema abierto en la cosmología moderna. Existen dos equipos que trabajan con las observaciones de cefeidas del HST (Telescopio espacial Hubble) y obtienen un valor de  $73 \pm 5$ , mientras que otro grupo obtiene un valor de  $57 \pm 4$  [km/s/Mpc].

### **La Teoría del Big Bang**

El hombre, desde el principio de los tiempos, ha tratado de resolver el misterio de la creación del Universo. Innumerables han sido los mitos y las leyendas que, en las diversas culturas, han surgido como fiel testimonio de esta búsqueda incansable. Actualmente, el desarrollo acelerado de la ciencia y la tecnología nos ha dado una visión más esclarecedora de la evolución cósmica, permitiéndonos incluso conjeturar no sólo sobre su historia, sino también sobre el posible futuro que pueda acaecernos.

La teoría del Big Bang, que en Inglés quiere decir la gran explosión, es una de las teorías científicas más populares y actualmente goza de un alto grado de aceptación. Ella se basa fundamentalmente en acontecimientos físicos como la expansión del Universo, las cantidades relativas de hidrógeno y helio, y la existencia de la radiación térmica cosmológica (radiación de fondo).

Como vimos antes, el efecto Doppler (ver figuras 10-12), consiste en que:

- ✓ Cuando una fuente se acerca la frecuencia emitida aumenta (sonido más agudo, color más azul)
- ✓ Cuando una fuente se aleja, la frecuencia emitida disminuye (sonido más grave, color más rojo)

$$\Delta f_{\text{frecuencia}} = k \cdot \text{Velocidad}$$

$$\Delta f = k \cdot V \quad (15)$$

Este se presenta cuando una fuente de ondas se desplaza en forma radial (esto es, alejándose o acercándose) a un espectador o receptor. Como vimos antes, este fenómeno afecta a todo tipo de ondas, inclusive a las electromagnéticas, por lo tanto, lo mismo ocurrirá con la luz visible, que es, en esencia, un tipo particular de una onda electromagnética.

Las ondas más largas del espectro luminoso corresponden a la luz de color rojo, mientras que las más cortas, al violeta. Slipher, un astrónomo del observatorio Lowell en Estados Unidos, descubrió que las ondas de luz provenientes de la mayoría las galaxias observadas por él se alargaban (se corrían hacia el rojo del espectro). Infirió que todas ellas se alejaban de nosotros, exceptuando aquellas pertenecientes al grupo local. Parecía que las galaxias huían del sistema solar como si se tratase de una enorme fuga. Esto, en un principio, desconcertó a los científicos. ¿Por qué las galaxias se alejaban unas de otras?. Se llegó a la conclusión que el Universo en que vivimos se está expandiendo. Esta apreciación fue respaldada en 1929 cuando el astrónomo estadounidense Edwin Hubble trabajando en el observatorio de Monte Wilson estableció su "ley de recesión de las galaxias", según la cual, la velocidad con que las galaxias se alejan es directamente proporcional a la distancia a la que se encuentran.

$$V=H.d \tag{16}$$

Como en toda proporción, existe una constante, a la que se le llamó “*constante de Hubble*” ( $H$ ), cuyo valor actual es

$$H \approx \frac{1}{1.5 \cdot 10^{10} \text{ y}} = 4.7 \cdot 10^{17} \text{ s}^{-1} \approx 60 \text{ km/s.Mpc}$$

$$H = v/d = 65 \text{ kilómetros/segundo} \times \text{Mpc} \tag{17}$$

$$1 \text{ pc} = 3.26 \text{ l.y} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ m}$$

$$1 \text{ l.y} = 9.46 \times 10^{15} \text{ m}$$

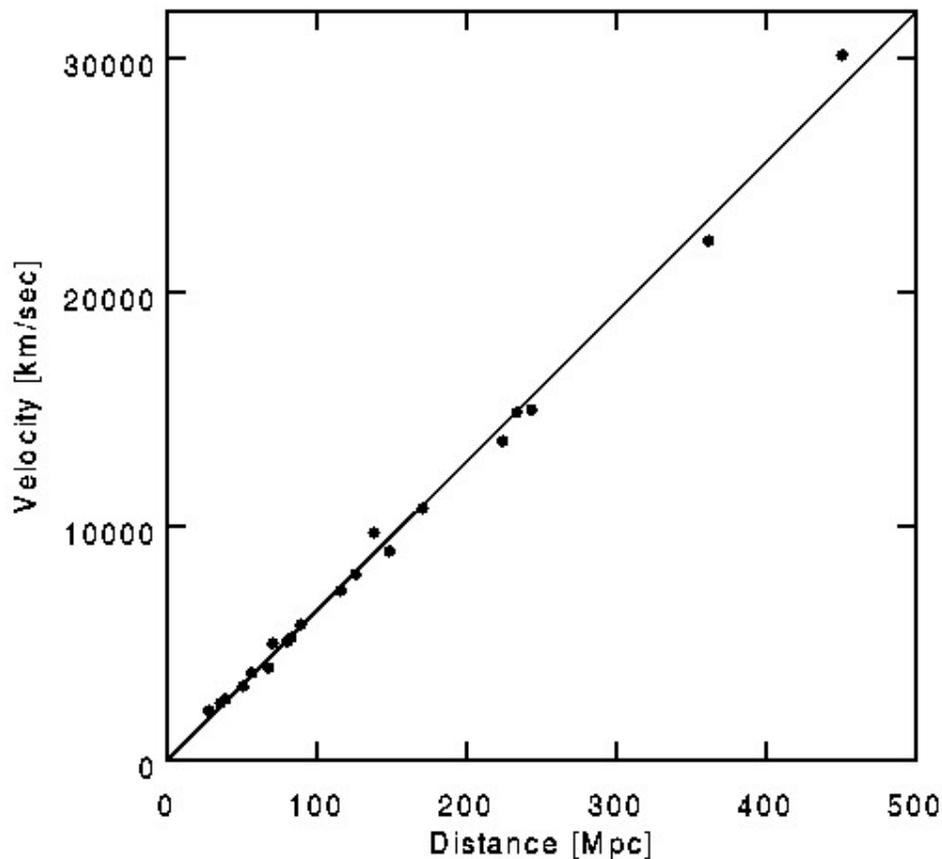
$$1 \text{ Mpc} = 3,260,000 \text{ l.y} = 3,086 \cdot 10^{22} \text{ m}$$

Esto significa que las galaxias se alejan de nosotros a unos 65 kilómetros por segundo cada 3 millones de años luz de distancia. Otra consecuencia importante de la Ley de Hubble es que si retrocedemos en el tiempo, podemos deducir que antes las galaxias estaban más cerca que hoy. Por lo tanto si tomamos una Galaxia arbitraria que está a una distancia  $d$  actualmente, ¿hace cuánto tiempo ( $T_{BB}$ ) estaba contigua a la nuestra? (que tomamos como referencia). Suponiendo que la velocidad fue constante, podemos calcular ese tiempo  $T_{BB}$  como:

$$T_{BB} = \frac{d}{v},$$

siendo  $v$  la velocidad de la Galaxia. Según la Ley de Hubble, la velocidad de dicha Galaxia viene dada por  $v=H.d$ . Por lo tanto, el tiempo que pasó desde que la Galaxia en cuestión estaba contigua a nosotros es:

$$T_{BB} = \frac{d}{v} = \frac{d}{H \cdot d} = \frac{1}{H} \approx 1.5 \times 10^{10} \text{ años} . \tag{18}$$



**Figura 20.** Datos de valores medidos de velocidades de recesión en función de la distancia para varias Super Novas Tipo Ia (Type Ia SNe from Riess, Press and Kirshner (1996)). La relación lineal observada está de acuerdo con la Ley de Hubble. Los datos originales de Hubble (figura 19) mostraban mucha más dispersión que esta versión más moderna.

Nótese que este tiempo es el mismo para cualquier galaxia e indica, por lo tanto, el tiempo que transcurrió desde el instante singular en el tiempo en que todo el Universo estuvo junto o sea éste sería el tiempo transcurrido desde el instante del Big Bang hasta hoy. Además este tiempo ( $T_{BB}$ ) es simplemente la inversa de la constante de Hubble  $H$  que se determinó experimentalmente.

Albert Einstein enunció entre 1915 y 1917 un marco teórico adecuado para estudiar la estructura del Universo. De Sitter trabajó sobre él y planteó el primer modelo del Universo en expansión. Otros científicos que también buscaron una interpretación relativista de la expansión del Universo fueron Alexander Friedmann y George Henri Lemaître. El modelo de Lemaître postulaba que el Universo se expandía no sólo por las evidencias matemáticas encontradas por Einstein, sino también debido a un fenómeno físico: una gran explosión. El científico ruso-americano George Gamow bautizó el modelo de Lemaître como "teoría del Big Bang" y fue uno de sus más asiduos defensores.

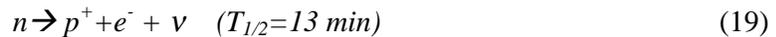
La teoría del Big Bang supone que toda la materia del Universo estuvo, en un comienzo, concentrada en un mismo lugar del espacio. Esta masa de volumen pequeño (comparado

con la extensión del Universo) fue bautizada como "huevo cósmico" por Gamow o "átomo primitivo" por Lemaitre. Si toda la materia existente en el Universo estuvo concentrada en una sola estructura, su densidad debió ser inimaginablemente grande. De igual forma, se estima que su temperatura alcanzó unos 100 mil millones de grados Celsius. En tales condiciones, ni siquiera existirían los átomos como los ha definido la química. Al explotar, la energía fue transformándose paulatinamente en materia, a medida que se alejaba en todas direcciones. En un instante *nacían tiempo y espacio*.

### **Formación de los elementos livianos: $^1\text{H}$ , $^2\text{D}$ , $^4\text{He}$ , $^7\text{Li}$ , $^9\text{Be}$ – Los primeros tres minutos del Universo**

Como vimos, toda la materia ordinaria, es decir la materia de la que esta hecha la Tierra y nosotros mismos, esta formada por átomos. En la naturaleza existen 92 elementos o especies de átomos. Cuando ellos se combinan, forman todas las sustancias que conocemos, ADN, piedras, agua, aire, etc.

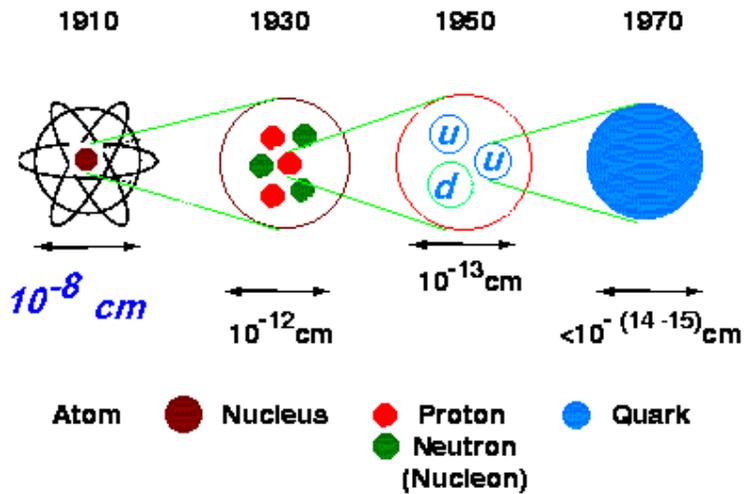
Dado que en los primeros instantes del Universo la temperatura era muy alta, no era posible que estuvieran presentes átomos o núcleos. Sabemos que a altas temperaturas, como las que hay en el Sol los átomos se rompen en sus componentes. A temperaturas aún más elevadas, lo mismos núcleos se rompen en sus componentes más básicos. Por lo tanto, la hipótesis es que los elementos se formaron poco después del Big Bang, comenzando por las partículas que forman los núcleos (protones y neutrones) y continuando por los núcleos de los átomos mismos. Los átomos se formaron mucho después, cuando las temperaturas eran suficientemente frías ( $t=300.000$  años). El problema para la formación de los núcleos es que el neutrón es inestable y decae (se desintegra) en 13 minutos, siguiendo la reacción siguiente:



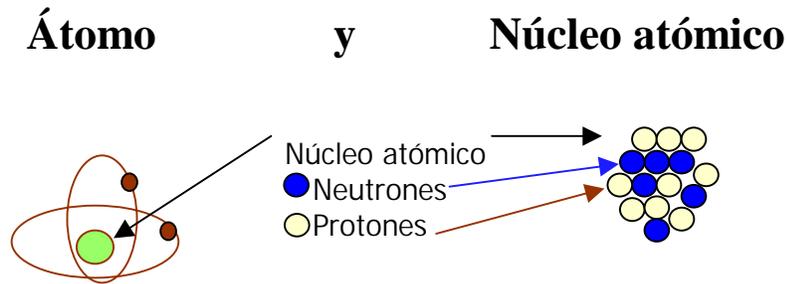
Para que se formen los elementos livianos hay sólo unos escasos minutos, más específicamente 3 minutos después del Big Bang. Después de esos 3 minutos no quedan suficientes neutrones para formar más elementos. Por lo tanto los elementos livianos en el Universo actual son una especie de fósil del Big Bang. Equivalentemente podríamos decir que estos elementos son una especie de huella digital, o mejor aún, una mancha de sangre con toda la información de ADN del asesino en la escena del crimen, que nos permite resolver el caso. Además, la abundancia actual de los elementos livianos ( $\text{H}$ ,  $\text{D}$ ,  $^4\text{He}$ , etc) en la naturaleza datan de esa época, los primeros tres minutos después del Big Bang. Por lo tanto esta información experimental es un dato bien conocido que permite poner a prueba los modelos que describen los escenarios existente en ese momento. De nuevo tenemos aquí otra ilustración de cómo la cosmología actual se construye sobre evidencias observables.

## Tabla Periódica de los elementos

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U												



**Figura 21.** Arriba, tabla periódica de los elementos químicos, donde se ven todos los átomos clasificados de acuerdo a sus propiedades. Abajo, diagrama esquemático de los constituyentes del átomo.



**Figura 22.** Diagrama esquemático de un átomo y su núcleo.

Al transcurrir los primeros tres minutos, recién comienzan a aparecer los núcleos de los átomos más sencillos, hidrógeno y helio. Los modelos predicen que la formación de estos átomos, se hizo a razón de cuatro átomos de hidrógeno por uno de helio. Las mediciones actuales confirman estos porcentajes de 75% para el hidrógeno y 25% para el helio. Los átomos más pesados, como el hierro, el carbono, el cobre y el resto de los elementos de la tabla periódica, fueron creados en el interior de las estrellas de gran masa. Posteriormente ellos fueron esparcidos por el cosmos al explotar dichas estrellas, en forma de una supernova. Podemos decir, que la fase supernova de una estrella masiva constituye algo así como el último estertor de la misma. De este modo, la Tierra, el Sol y los planetas, incluyéndonos a nosotros mismos, somos polvo de estrellas.

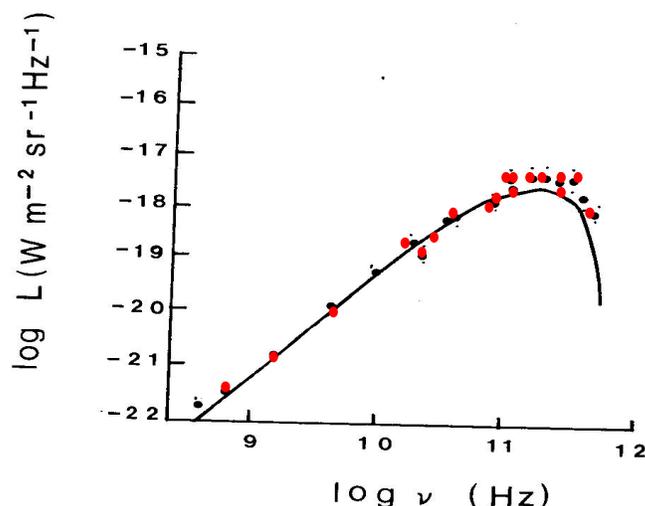
Debieron pasar cientos de miles de años desde la gran explosión para que la temperatura y los consiguientes choques entre las partículas elementales disminuyera, lo que permitió que los núcleos atómicos capturaran sus electrones y se formen los primeros átomos. Al mismo tiempo, la temperatura fue descendiendo gradualmente y la velocidad de expansión de la materia fue cada vez menor. Los átomos diseminados en todas direcciones, se fueron condensando y formaron lo que hoy son galaxias, estrellas, planetas y todos los cuerpos celestes conocidos.

### **Radiación Cómica de Fondo (CMB)**

**Figura 22.** Penzias y Wilson recibirían el premio Nóbel de Física en 1978 por el descubrimiento de la radiación cósmica de fondo (CMB). G.Gamov, uno de los primeros en predecir su existencia en los años 40, murió unos diez años antes.



Haciendo una analogía, podemos decir que la evolución del Universo equivaldría, en cierta forma, a lo que ocurre con una nube de vapor de agua que se expande al subir por la atmósfera. A medida que se expande se enfría, el vapor se transforma en líquido, el líquido se condensa en gotitas de agua que finalmente precipitan en forma de lluvia. La relación entre expansión y enfriamiento es tan estrecha, que los científicos han logrado, a partir de ella, calcular con gran exactitud la temperatura teórica a la que debería encontrarse el Universo en la actualidad. Tal temperatura es de 3 K (en la escala absoluta de Kelvin) ó -270 grados Celsius bajo cero. Como vimos antes, un cuerpo a una temperatura determinada, emite radiaciones electromagnéticas características de esa temperatura (ver figura 13) y era de esperarse que existiese algún tipo de radiación que confirmase los 3 K calculados para el Universo. No fue sino hasta 1964 cuando los ingenieros de la Bell Telephone Arno Penzias y Robert Wilson, efectuando mediciones de ondas de radio en New Jersey, descubrieron una radiación de fondo que interfería con su trabajo y que no podían eliminar, ya que parecía provenir de todo el Universo. Inmediatamente dieron la noticia a los físicos de la Universidad de Princeton que trabajaban en la teoría del Big Bang.

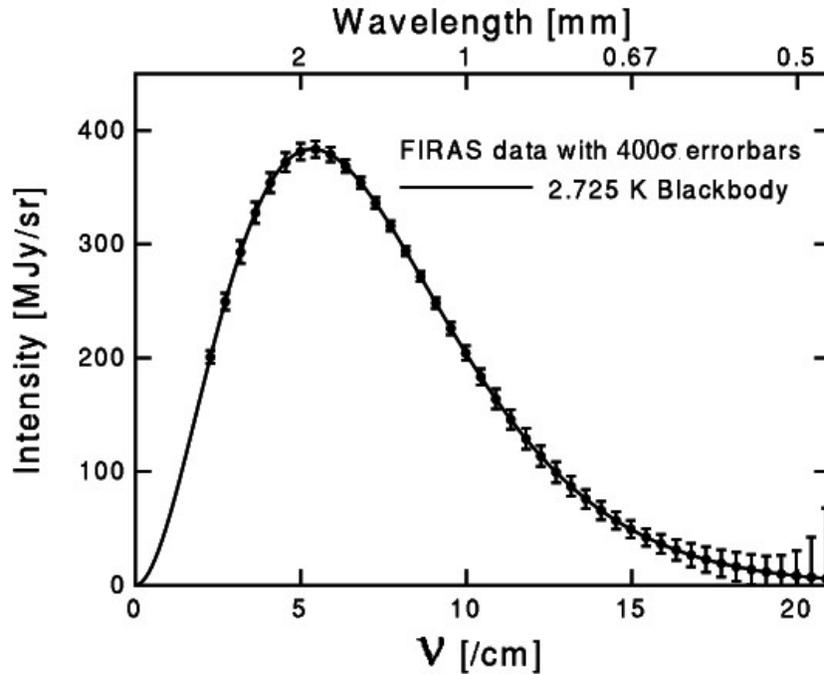


**Figura 23.** Espectro de radiación de fondo cósmica medida por Penzias y Wilson. Los puntos discretos son los valores medidos. La curva continua es la predicción de la radiación de un cuerpo negro a la temperatura  $T=3 \text{ k}$  ( $= -270 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Ver Fig. 13.

Ellos confirmaron que dicha radiación era el “fósil físico” buscado por los científicos que correspondería a la radiación electromagnética que emite un cuerpo a 3 grados Kelvin. Naturalmente, este descubrimiento, uno de los más importantes de la radio astronomía, significó un fuerte respaldo a la teoría del Big Bang. Penzias y Wilson recibieron el premio Nóbel de física por el descubrimiento de lo que posteriormente se denominó "radiación térmica cosmológica" o CMB. De hecho, se estima que cerca del 10% del ruido de fondo que se observa en un televisor común, al sintonizar en un canal no ocupado por una señal de una emisora, esa especie de lluvia, es consecuencia de la radiación de fondo.

En resumen:

- ✓ El espectro de la radiación de fondo (CMB) corresponde al de un cuerpo (negro) a la temperatura de 2.725 Kelvin.
- ✓ La CMB es una reliquia del momento en que el Universo estaba muy caliente, era muy denso y muy opaco. Mas precisamente del instante en que la temperatura era tal, que los fotones interactuaban fuertemente con los átomos de H ionizándolos. A mediada que el Universo se enfrió, la radiación no pudo seguir ionizando los átomos, es decir la radiación se desacopló de la materia y siguió viajando hasta el presente.
- ✓ Los puntos más calientes o “Hot spots” en la CMB resultan de fluctuaciones en la temperatura del Universo en el momento del desacople de la radiación con la materia.



**Figura 24.** Espectro de radiación de fondo cósmica obtenido en la década de los 90 con el instrumento FIRAS del Satélite COBE de la NASA. La línea continua corresponde a la radiación de un cuerpo negro a  $T=2.725$  K. Comparar con figuras 13 y 23.

### Teoría del estado estacionario

La teoría del Big Bang tiene actualmente el rango de un paradigma de la cosmología. Sin embargo no todos los científicos comparten sus postulados. Algunos científicos consideran que el Universo no tiene principio ni fin. Para ellos el Universo no comenzó con el Big Bang, y en esencia el Universo siempre fue igual a como lo observamos en la actualidad. Esta hipótesis se conoce como “teoría del estado estacionario”. Tuvo su origen a comienzos del siglo XX e incorpora en ella la expansión de Universo y la homogeneidad del mismo. Los representantes más destacados de esta teoría son los astrónomos británicos Herman Bondi, Thomas Gold y Fred Hoyle, que propusieron este modelo en los años posteriores a la segunda guerra mundial. Según esta hipótesis el Universo se expande por siempre y la materia se crea continuamente de modo que en promedio la densidad del Universo permanece constante. La nueva materia se acumula y forma nuevas estrellas y galaxias, las cuales reemplazan a las que se van apagando o muriendo. Según esta hipótesis no sólo el Universo es homogéneo, sino que además las galaxias más alejadas son estadísticamente idénticas a las galaxias más cercanas a nosotros. Esto se conoce como el “principio cosmológico perfecto”. La teoría del Big Bang difiere significativamente en este punto. En esta última teoría las zonas más lejanas del Universo son más jóvenes, ya que la luz tardó más tiempo en llegar a nosotros. Por consiguiente, las galaxias en esas zonas deben estar en un estadio de desarrollo más temprano que el nuestro, con más estrellas grandes y de corta vida (estrellas jóvenes) que las galaxias cercanas a nosotros. Otra característica de esta teoría, es que no necesita del fondo de radiación cósmica (CMB) y por supuesto sí requiere que la materia se cree continuamente.

Sin embargo, cuando se descubrió la radiación de fondo, impresionados por el inesperado descubrimiento, los partidarios del modelo estacionario retrocedieron durante algún tiempo, para volver a la carga y contraatacar utilizando el mismo descubrimiento contra sus rivales. La radiación de fondo observada era extraordinariamente pareja (isotrópica) en todas las direcciones, revelando un Universo homogéneo. ¿Cómo podían entonces explicarse las enormes estructuras que se ven en el Universo actual, cómo galaxias y cúmulos de galaxias?. La radiación observada debía tener otro origen, decían.

Los partidarios del modelo del Big Bang salieron entonces a buscar esas irregularidades, que tenían que existir en alguna parte. Se hicieron numerosas observaciones y se montaron sofisticados detectores en globos y satélites para analizar más detalladamente la radiación de fondo. En 1992 cuando se comenzaron a analizar los datos obtenidos por el observatorio orbital COBE (Cosmic Background Explorer) un satélite de la NASA, se encontraron irregularidades en la temperatura de la radiación de fondo (CMB), consistentes con lo que se esperaba según el modelo del Big Bang. Estas imágenes fueron mejoradas por el Satélite WMAP (ver Fig. 27). Stephen Hawking, dijo sobre estas imágenes: “Es como mirar hacia atrás, al origen mismo del Universo”.

Hasta el momento, ningún instrumento creado por el hombre ha sido capaz de detectar la creación de un sólo átomo de hidrógeno en un espacio tan grande, además el descubrimiento de la radiación de fondo (CMB) junto a las pequeñísimas fluctuaciones detectadas recientemente por los satélites COBE y WMAP (ver Fig. 24) falsean la hipótesis del estado estacionario y avalan las predicciones del modelo del Big Bang.

### **Descubrimientos recientes – Materia oscura y energía oscura**

En la actualidad se dispone de mapas confiables del Universo, que fueron recogidos con diversas técnicas que hacen uso de distintas zonas del espectro electromagnético, que van desde las ondas de radio hasta los rayos gamma, incluyendo desde luego las microondas. Para explicar teóricamente estos mapas los científicos necesitan introducir en sus cálculos y modelos mucho más masa de la que cabría esperar si toda la masa proviniese de las estrellas visibles. En otras palabras, parecería haber mucho más masa en el Universo de la que vemos. Esto es parecido a lo que a veces observamos en la escuela. Por los ruidos provenientes de un aula contigua podemos inferir que la misma está muy concurrida, aunque no podamos realmente ver a ninguna persona, es decir tenemos evidencia indirecta de su presencia.

Con el término “materia oscura” se designa comúnmente a aquella parte de la masa que debería haber en el Universo para que nuestras observaciones sean consistentes con las teorías, pero que en realidad no vemos. Sabemos que hay “materia”, porque podemos ver los efectos de su influencia gravitacional. Sin embargo, la materia no emite una radiación electromagnética que sea detectable, por lo tanto es “oscura”. Por ejemplo, sabemos que existen muchos sistemas de estrellas dobles. Una de las características de éstas es que ambas giran alrededor de un punto llamado su centro de masa o de gravedad. A veces se observa una sola estrella que parece rotar alrededor de un punto, similar a una estrella doble, pero no podemos ver a su compañera. Esto nos lleva a suponer que seguramente hay una compañera, que por alguna razón no brilla y por consiguiente no vemos. Existen muchas hipótesis sobre la naturaleza de la masa perdida, que van desde exóticas partículas subatómicas hasta planetas, estrellas de neutrones y agujeros negros.

A veces se habla de enanas blancas y marrones. Lo notable de este tipo de materia, es que según las estimaciones actuales, la llamada “energía oscura” constituiría el 74 % de toda la masa del Universo (recordar que masa y energía son equivalentes) y la materia oscura propiamente sería un 23%, siendo la materia ordinaria solo el 0.5% de la materia del Universo. En realidad a lo que nos referimos con materia oscura es una materia cuyos efectos observamos (escuchamos los ruidos de los estudiantes del ejemplo anterior) pero no observamos su brillo (no vemos a los estudiantes). Lo que parece haberse perdido es la luz asociada a estos objetos. El desafío actual de la ciencia es conocer la naturaleza de este tipo de materia y lograr evidencia adicional e independiente de su existencia.

Alrededor de los años 30, el astrónomo Fritz Zwicky estaba estudiando el movimiento de cúmulos masivos, de galaxias distantes, en concreto el cúmulo Coma y el cúmulo Virgo. Zwicky calculó la masa de cada galaxia en el cúmulo basándose en su luminosidad. Luego trató de estimar la masa basándose en la que sería necesario tener en el cúmulo para contrarrestar la fuerza centrífuga que las tendía a apartar y encontró que la masa era 400 veces mayor que la masa estimada basándose en el primer cálculo. Esta anomalía desde entonces permanece sin ser resuelta.

Más tarde, en los años 70 y 80, se observaron nuevas anomalías en algunas galaxias espirales que rotan. Las estrellas que están en la periferia, al igual que las órbitas planetarias, deberían obedecer la tercera ley de Kepler ( $T^2 = k.R^3 \Rightarrow \text{velocidad} = 2\pi R / T \propto 1/\sqrt{R}$ ) que llevaría a concluir que las estrellas más alejadas del centro de la galaxia deberían de tener velocidades decrecientes con su distancia al centro. Sin embargo se observa que las velocidades orbitales de estas estrellas permanecen casi constantes. La única explicación razonable es que en la galaxia hay más masa que la que vemos brillar. Otra forma de entender la anomalía es la siguiente. Si las estrellas cercanas al perímetro de una galaxia espiral, con velocidades orbitales en torno a los 200 kilómetros por segundo, fuesen retenidas por la fuerza gravitatoria de la materia que vemos, esta no sería suficiente para contrarrestar el efecto centrífugo, y las galaxias espirales deberían estar en pleno proceso de desintegración, cosa que no se observa.

Para explicar éstas y otras muchas anomalías, se propusieron diversas hipótesis, como la existencia de WIMPs (partículas elementales masivas que interactúan débilmente, por ejemplo neutrinos masivos), MACHOs, objetos masivos y compactos, especies de planetas, agujeros negros primordiales, etc. Sin embargo, ninguna de estas hipótesis ha sido demostrada observacionalmente ni aceptada por la comunidad científica.

No obstante, su búsqueda continúa arduamente, ya que nuestro destino final como Universo depende del valor de la masa o densidad promedio del Universo. Si la masa es menor que un cierto valor, llamado densidad crítica,  $\rho_{crit}$ , el Universo se seguirá expandiendo y enfriándose hasta apagarse por completo (un destino a veces conocido como el Big Chill), el Universo tendría un destino similar al de las creencias religiosas judeo-cristianas. Si la densidad de Universo es mayor que  $\rho_{crit}$ , en algún momento la expansión concluiría y comenzaría a contraerse para terminar en los que se conoce como el Big Crunch, que llevaría posiblemente a un nuevo Big Bang. En este caso, el Universo sería de carácter pulsante, con Big Bangs seguidos de Big Crunchs, en una especie de ciclos de muertes y “reencarnaciones” indefinidos, similares a los mitos Hindúes o sería

eterno como sostenían los antiguos Griegos. Finalmente, es posible que la densidad del Universo sea justamente la crítica, en cuyo caso estaríamos a mitad del camino entre estas dos alternativas extremas.

### **Teoría del Universo pulsante**

¿Qué hacía Dios antes de crear el mundo? Esta es una antigua pregunta que preocupó a algunos teólogos en la antigüedad y ha sido objeto de estudio y preocupación de la ciencia. Se dice que algunos irónicos solían responder que antes de crear el mundo, Dios estaba ocupado haciendo los infiernos, para todos aquellos que realizan este tipo de preguntas. Según S. Hawking, al igual que para muchos otros científicos, esta pregunta es engañosa, ya que según la teoría general de la relatividad a medida que la masa se concentra más, el tiempo transcurre más lentamente. De modo que en el instante justo del Big Bang, al ser la densidad infinita, el tiempo se detiene. En otras palabras no hay antes del Big Bang, el Big Bang es también el comienzo del tiempo.

Otros científicos se inclinan a pensar que la evolución del Universo abarca una dimensión temporal que va mucho más allá de la explosión primordial y de la actual expansión. Actualmente las agrupaciones de galaxias y los cúmulos estelares, se mueven separándose unos de otros en franca expansión. Si la densidad del universo es mayor que su valor crítico, la teoría del Big Bang supone que la velocidad de recesión de dichos objetos era mayor en el pasado que hoy. La teoría del Universo pulsante sostiene que en un futuro inminente, la fuerza gravitatoria resultante del Universo será capaz de frenar su expansión, hasta el punto de iniciar el proceso contrario, es decir, una contracción. Todos los cuerpos celestes comenzarían a acercarse unos a otros a una velocidad cada vez mayor, hasta encontrarse en un mismo punto y constituir otra vez el huevo cósmico. (Big-crunch). Este huevo, después de cierto lapso de tiempo, volvería a estallar, dando origen a otro Universo expansivo.

El ciclo se repetiría eternamente, perpetuándose en el tiempo. Nuestro Universo sería el último de muchos surgidos en el pasado, luego de sucesivas explosiones y contracciones (pulsaciones). El momento en que el Universo se desploma sobre sí mismo atraído por su propia gravedad es conocido como "Big Crunch" en el ambiente científico. El Big Crunch marcaría el fin de nuestro Universo y el nacimiento de otro nuevo, tras el subsiguiente Big Bang que lo forme. Si esta teoría llegase a ser correcta, el Big Crunch ocurriría dentro de unos 150 mil millones de años. Si nos remitimos al [calendario de Sagan](#), esto sería dentro de unos 10 años a partir del 31 de diciembre.

### **Estimación de la densidad crítica de Universo (opcional)**

Subyacente en esta historia, está la cuestión de la masa crítica de Universo, o mejor dicho la densidad crítica del Universo, es decir cual es la densidad que divide las aguas entre el Universo tipo A y B. Usaremos para esto el mismo argumento que usamos para saber si cuando arrojamos una piedra verticalmente hacia arriba la misma vuelve al suelo o nunca regresara. Como sabemos en el momento de arrojar la piedra, el sistema piedra-Tierra tiene energía potencial gravitatoria  $E_G$  y energía cinética  $E_C$ :

$$E_T = E_G + E_c = -G \cdot \frac{m_p \cdot M_T}{R_T} + \frac{1}{2} \cdot m_p \cdot v_0^2 = -G \cdot \frac{m_p \cdot M_T}{r} + \frac{1}{2} \cdot m_p \cdot v^2 \quad (20)$$

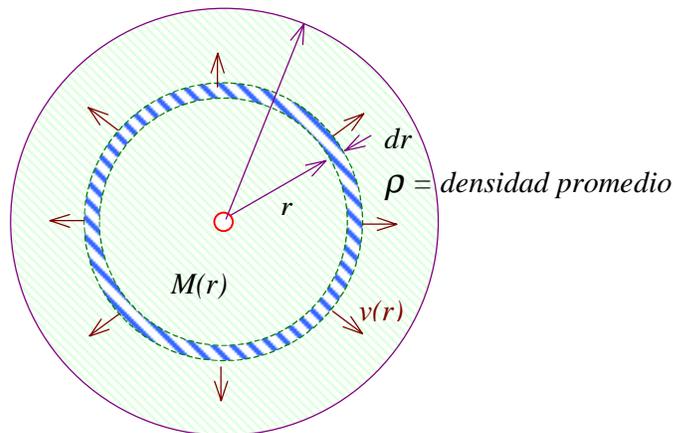
Aquí,  $m_p$  es la masa de la piedra,  $M_T$  y  $R_T$  la masa y radio de la Tierra respectivamente,  $G$  la constante universal de la Gravedad y  $v_0$  la velocidad inicial de la piedra. El segundo miembro corresponde al estado cuando la piedra deja nuestra mano, el tercero se refiere al estado en que se ha alejado a una distancia  $r$ . A medida que la piedra sube, se aleja de la Tierra,  $r$  aumenta, y la energía potencial gravitatoria disminuye en valor absoluto, como  $E_p$  es negativa, al aumentar  $r$ , ella aumenta, por lo tanto la energía cinética debe disminuir para que la suma sea constante. Si la energía total  $E_T$  es negativa, significa que la energía cinética (siempre positiva) es menor que el valor absoluto de la energía potencial gravitatoria. Por lo tanto, a medida que la piedra se aleja de la Tierra, llegará a una distancia  $R_{max}$ , donde la energía cinética será nula y toda la energía será potencial. Este será el punto de máximo alcance de la piedra y a partir de allí comenzará su descenso. Si por el contrario, la energía total  $E_T$  es nula o positiva, la piedra nunca regresará. Tomemos un pedazo del Universo, digamos una esfera de radio  $r$ , centrada en una dada galaxia por ejemplo la nuestra. Como sabemos, las galaxias se alejan unas de otras siguiendo la ley de Hubble. Por lo tanto las galaxias que estén dentro de la capa (como una especie de cebolla) de radio  $r$  y espesor  $dr$ , se alejaran del centro con una velocidad  $v(r)$  dada por:

$$v(r) = H \cdot r \quad (21)$$

Por lo tanto dicha capa tendrá asociada una energía cinética:

$$dE_c = \frac{1}{2} \cdot dm \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot 4\pi \cdot r^2 \cdot dr) \cdot (H \cdot r)^2 \quad (22)$$

Aquí,  $\rho$  es la densidad promedio del Universo. La energía potencial de esta capa de cebolla será:



**Figura 25.** Muestra del Universo, centrada en una dada galaxia, por ejemplo la nuestra,  $\rho$  es la densidad de materia promedio.  $r$  es el radio de una capa infinitesimal, de espesor  $dr$  (cáscara de la cebolla) de masa  $dm$ .  $v(r)$  es la velocidad de recesión de dicha capa, vista desde el centro.

$$dE_G = -G \cdot \frac{dm \cdot M(r)}{r} = -G \cdot \frac{(\rho \cdot 4\pi \cdot r^2 \cdot dr) \cdot \rho \cdot \frac{4\pi}{3} \cdot r^3}{r} = -G \frac{(4\pi)^2}{3} \cdot \rho^2 \cdot r^4 \cdot dr \quad (23)$$

Donde  $M(r)$  es la masa dentro de la esfera de radio  $r$ , o sea  $M(r) = 4/3 \pi \rho r^3$ . Combinando las expresiones (21), (22) y (23), la energía total de la capa (de cebolla) en consideración será:

$$\begin{aligned} dE_T &= -G \frac{(4\pi)^2}{3} \cdot \rho^2 \cdot r^4 \cdot dr + 2\pi \cdot \rho \cdot H^2 \cdot r^4 \cdot dr = \\ &= 2\pi \cdot \rho \cdot \left( -G \cdot \frac{8\pi}{3} \rho + H^2 \right) \cdot r^4 \cdot dr \end{aligned} \quad (24)$$

La energía total de la esfera en consideración de radio  $R$ , será la suma (Integral) de las contribuciones de cada capa. El resultado puede obtenerse fácilmente y es:

$$E_T(R) = \frac{2\pi}{5} \cdot \rho \cdot \left( -G \cdot \frac{8\pi}{3} \rho + H^2 \right) \cdot R^5 \quad (25)$$

Notese que el signo de la expresión (25) esta determinado por el termino entre paréntesis que es el mismo que el de la ecuación (24). Ahora bien, a igual que en el caso de la piedra, esta muestra arbitraria del Universo que hemos elegido para nuestro análisis, continuará expandiéndose para siempre o alcanzará una grado de expansión máxima según su energía total  $E_T(R)$  sea positiva o negativa. Claramente el valor crítico que divide las aguas es cuando  $E_T = 0$ . Si aplicamos esta condición a la ecuación (25), obtenemos el valor de la densidad crítica,  $\rho_c$ :

$$\rho_c = \frac{3}{4\pi} \cdot \frac{H^2}{G} \quad (26)$$

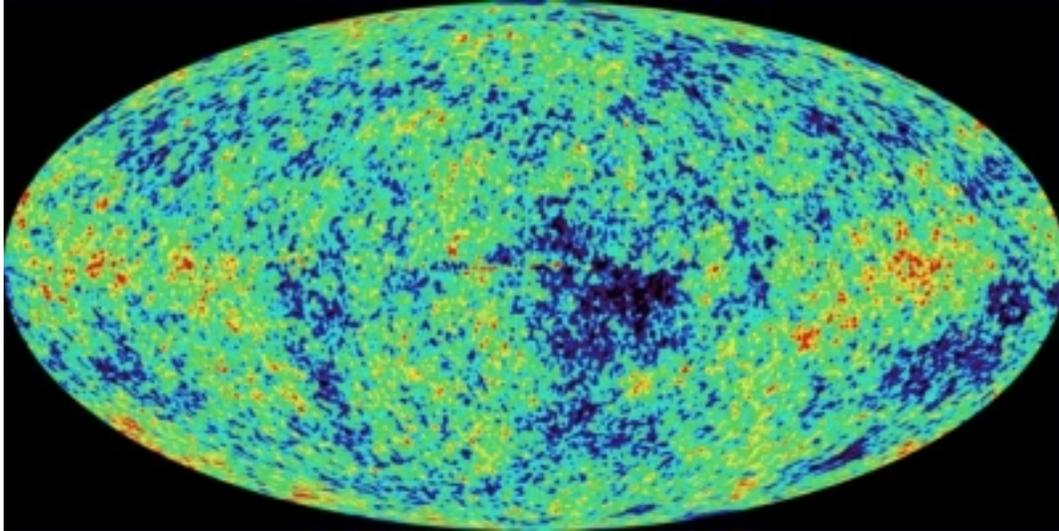
Usualmente se define el parámetro  $\Omega$  como el cociente de la densidad a su valor crítico:

$$\Omega = \frac{\rho_{real}}{\rho_c} = \frac{\rho_{real}}{3} \cdot \frac{8\pi \cdot G}{H^2} \quad (27)$$

Usando los valores aceptados para  $G (= 6.6 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{Kg}^2)$  y la constante de Hubble  $H (\approx 4.7 \cdot 10^{-17} \text{ s}^{-1} \approx 1/1.5 \times 10^{10} \text{ años})$ , obtenemos:

$$\rho_c \approx 10^{-29} \text{ g/cm}^3 \approx 5 \text{ atomos de H/m}^3 \quad (28)$$

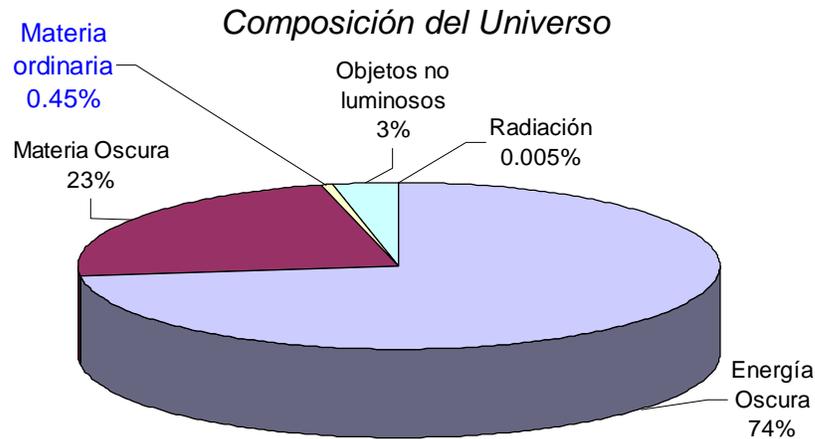
Este valor es muy pequeño, pero aun es casi 10 veces mayor que el valor observado. Sin embargo, hay muchos indicios muy sugestivos de que hay más masa en el Universo de lo que observamos o conocemos.



**Figura 26.** Imagen obtenida por el satélite Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) de la Nasa de la radiación de fondo (MCB). Aquí se amplificaron las variaciones de temperatura. Las variaciones de temperatura son del orden de 1 en 100000. Esto sería una especie de imagen de cómo el Universo lucía cuando tenía unos 300.000 años. Este sería la imagen más antigua del Universo que disponemos.

### **Conclusiones y consideraciones finales**

Tanto el satélite COBE, como posteriormente lo hizo el WMAP de la NASA muestran que la radiación de fondo (CMB), es extremadamente homogénea, pero que presenta una serie de pequeñas irregularidades, que son consistentes con hipótesis del Big Bang. En gran medida podemos decir que las observaciones recientes, corroboran en gran medida las hipótesis básicas del modelo del Big Bang y que en el Universo hay mucha más materia oscura que materia ordinaria. Además, cuando ya nos estábamos acostumbrando a esta incómoda situación de ser una pequeña minoría en el Cosmos, y desconocer que es exactamente que es la materia oscura, los datos de WMAP y otras observaciones recientes, nos trajeron una nueva sorpresa. Resulta que el Universo no solo se está expandiendo, sino que además su tasa de expansión está aumentando (se está acelerando la expansión). Para explicar este hecho, los científicos se vieron obligados a introducir una nueva componente del Cosmos, la “Energía Oscura”, cuya naturaleza tampoco conocemos, pero que tendría un efecto gravitatorio repulsivo, que sería lo que causaría la aceleración de la expansión. Pero lo más sorprendente, es que ésta componente desconocida, constituiría la mayor parte del Universo (74%), un 23% sería materia oscura, también de naturaleza desconocida y que sólo un 0.4 % es materia ordinaria, de la que está hecha la Tierra y nosotros mismos.



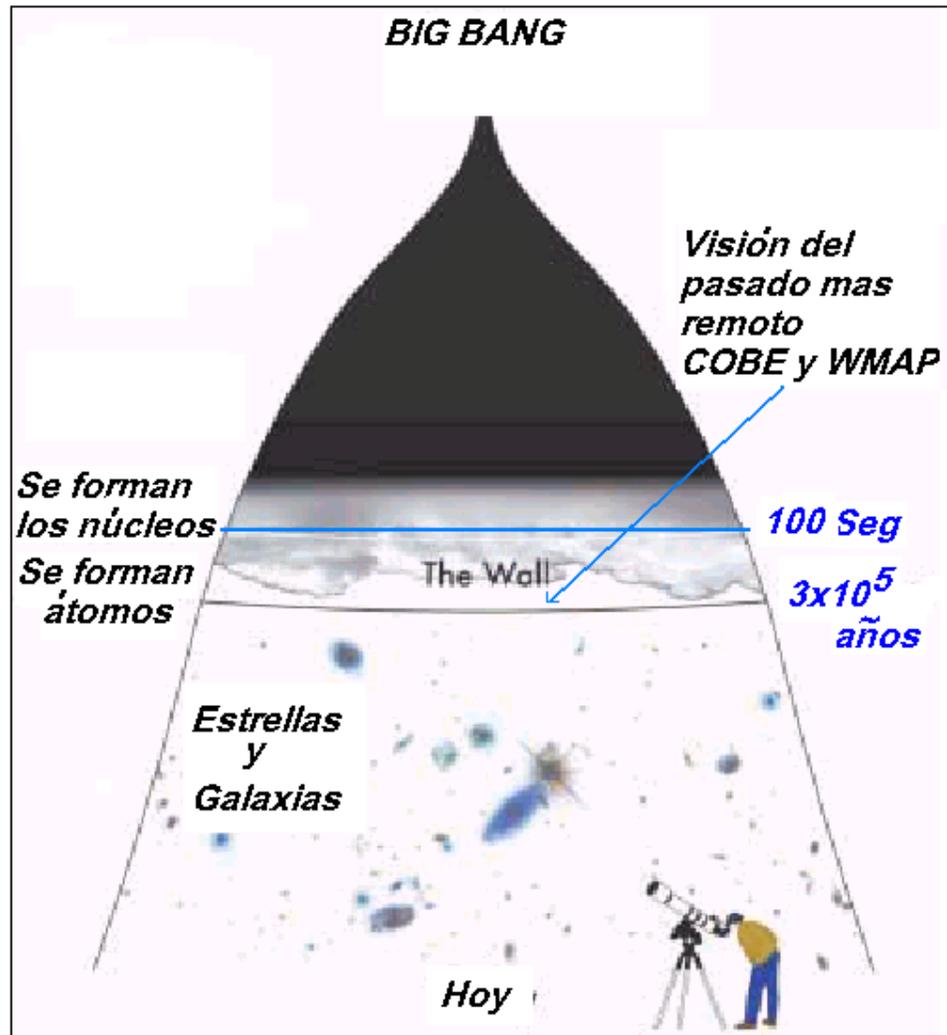
**Figura 27.** Composición del Universo. La materia ordinaria, parecería constituir menos del 1% de toda la materia del Universo.

Como vemos, hemos recorrido un largo camino en la comprensión del Cosmos, todo nuestro conocimiento se centra sólo en menos del 1% de mismo. Aun de esa pequeña fracción nos es mucho lo que conocemos. Todavía nos queda un tramo considerable para comprender los datos y observaciones que ya tenemos. Además, el camino parece estar llenos de sorpresas y desafíos.

*“One thing I have learned in a long life: that all our science, measured against reality, is primitive and childlike- and yet it is the most precious thing we have ”*  
A.Einstein

*“Somos los ojos del universo; la pequeña pieza conocida más despierta del cosmos”*  
Teilhard de Charden.

*“We are all in the gutter, but some of us are looking at the stars”*  
A. O. Wilde



**Figura 28.** Imagen esquemática del Universo. Al mirar galaxias más lejanas, miramos hacia el pasado (hacia arriba en el grafico). Finalmente observamos la radiación de fondo que proviene de la pared (wall), unos 300000 años después de Big Bang, instante en que la radiación dejo de interactuar con la materia. A este instante corresponde la imagen de la Fig. 26.

### Bibliografía

1. - "Comparación de entre la Física Aristotélica y la Mecánica Clásica" O. Lombardi, Educación en Ciencias 1 (3), 62-70, (1997) - Revista de la Universidad Nacional de San Martín- Buenos Aires, Argentina
2. - Breve Historia de Tiempo – S. Hawkins – Drakontos Buenos Aires 1997.
3. - El Big Bang - H. Umerez - Ed. Norma - Buenos Aires 1992
4. - Luz antigua - Alan Lightman Ed. A. Bello Santiago de Chile 1997 (Ancient Light - Harvar Univ. Press, Mass 1991)
5. - Cosmos. Sagan, Carl. Ed. Planeta S. A. Barcelona, 1986.
6. - Los Primeros Tres Primeros Minutos de Universo- S. Weinberg- Madrid - Alianza 1996.
7. - El Origen del Universo – J.J. Sanguineti – UCA – Buenos Aires 1999.

8. - *La aventura del Universo (Coming of age in the milkyway) T. Ferris* Barcelona – Grijalbo Mondadori 1997.
9. - *The History and Fate of the Universe*. Lawrence M. Krauss, [The Physics Teacher Vol. 41, March 2003](http://ar.geocities.com/udesa_fisica/cosmologia/origen-fate-univ_2k3.pdf) - [http://ar.geocities.com/udesa\\_fisica/cosmologia/origen-fate-univ\\_2k3.pdf](http://ar.geocities.com/udesa_fisica/cosmologia/origen-fate-univ_2k3.pdf)
10. - *Dark energy* - Ian Morison *Physics Education* 38 (3) 205, 2003- Excelente artículo– Recomendado. [http://ar.geocities.com/udesa\\_fisica/cosmologia/dark\\_energy.pdf](http://ar.geocities.com/udesa_fisica/cosmologia/dark_energy.pdf)
11. - *The Evolution Of The Universe*- P. James E. Peebles, David N. Schramm, Edwin L. Turner and Richard G. Kron - *Scientific American* 271, 52 (1994). Excelente articulo, muy facil de leer – Recomendado.
12. - *Making sense of modern cosmology* - P. Peebles. *Scientific American* January 2001- El número de Enero de 2001 de la revista *Scientific American* está dedicado a los avances recientes de cosmología -Excelente articulo, muy fácil de leer – Recomendado.
13. - *New Light on Dark Matter* – J. P. Ostriker and P. Steinhardt – *Science* Vol.300, p. 1909, June 2003 – El número de Junio de 2003 (Volumen 300) de la revista *Science* está dedicado a los avances recientes de cosmología.

### Referencias de Cosmología en la Web

1. - [Cosmología - El Origen del Universo](http://www.astrored.net/origen_del_universo/) - Breve Introducción - [http://www.astrored.net/origen\\_del\\_universo/](http://www.astrored.net/origen_del_universo/)
2. - [Curso básico de Cosmología](http://www.geocities.com/launchpad/2921/comolog.htm)- de Pedro J. Hernández <http://www.geocities.com/launchpad/2921/comolog.htm>
3. - *De Proyecto 2061- Project 2061 - Alfabetización científica para un futuro dinámico - Sitio de la Asociación Norteamericana para el avance de la ciencia.* <http://www.project2061.org/>
4. - [Clase interactiva de cosmología](http://ar.geocities.com/udesa_fisica/cosmologia/cosmo2/index.htm)- Breve introducción, con gráficos y figuras, del los conceptos básicos de Cosmología y Astronomía. Nivel introductorio. [http://ar.geocities.com/udesa\\_fisica/cosmologia/cosmo2/index.htm](http://ar.geocities.com/udesa_fisica/cosmologia/cosmo2/index.htm)
5. - [Astronomy Course Note Websites](http://members.aol.com/gca7sky/course.htm)- Sitio de Astronomía en Ingles <http://members.aol.com/gca7sky/course.htm>
6. - [An Introduction to Cosmology](#) - NASA. The [MAP Home Page](#)
7. - [Making sense of modern cosmology](#) P. Peebles. *Scientific American* January 2001, p.44
8. - [Introduction to cosmology](http://www.astro.virginia.edu/~jh8h/Foundations/contents.html) J. Hawley, Univ. of Virginia. Con preguntas. <http://www.astro.virginia.edu/~jh8h/Foundations/contents.html>
9. - [Cosmología: La evolución del Universo](#) P. Peebles, D. Schramm, E. Turner y R. Kron THE EVOLUTION OF THE UNIVERSE- P. James E. Peebles, David N. Schramm, Edwin L. Turner and Richard G. Kron - *Scientific American* 271, 52 (1994). [http://ar.geocities.com/udesa\\_fisica/tutoriales/cosmology\\_peebles.htm](http://ar.geocities.com/udesa_fisica/tutoriales/cosmology_peebles.htm)
10. - [Curso básico de astronomía](#) Astronomy Course Note Websites Univ. of Virginia. Muy completo en Ingles, con preguntas. <http://members.aol.com/gca7sky/course.htm>
11. - [Introducción a la teoría de la relatividad](http://fisica.usac.edu.gt/public/tesis_lic/enrique_p/node6.html) - Enrique Pazos 2000 [http://fisica.usac.edu.gt/public/tesis\\_lic/enrique\\_p/node6.html](http://fisica.usac.edu.gt/public/tesis_lic/enrique_p/node6.html)
12. - [La teoría de la RELATIVIDAD](http://www.geocities.com/angelto.geo/bhole/relativi.htm) ( Ángel Torregrosa Lillo) <http://www.geocities.com/angelto.geo/bhole/relativi.htm>
13. - [El Universo y su origen](http://home.earthlink.net/~umuri/ /Main/M_origen.html) Clase interactiva. [http://home.earthlink.net/~umuri/ /Main/M\\_origen.html](http://home.earthlink.net/~umuri/ /Main/M_origen.html)
14. - [Cosmology: origin, evolution, fate of material universe](http://background.uchicago.edu/~whu/beginners/introduction.html) Clase interactiva. <http://background.uchicago.edu/~whu/beginners/introduction.html>
15. - [Ned Write's cosmology tutorial](http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm) de UCLA, USA. Muy completo en Ingles. <http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm>
16. - [MARTIN WHITE Professor of Physics Professor of Astronomy UC Berkeley](http://astron.berkeley.edu/~mwhite/welcome.html) - and the [Hubble expansion](http://astron.berkeley.edu/~mwhite/welcome.html) by Matin White <http://astron.berkeley.edu/~mwhite/welcome.html>