

“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 - Edad de la Tierra](#)
- ✓ [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.astored.net/origen_del_Universo/
3. - [Curso básico de Cosmología](#)- de Pedro J. Hernández www.geocities.com/launchpad/2921/comolog.htm

Introducción

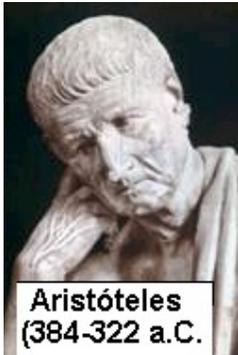
Los orígenes del Universo y de la vida han sido cuestiones que siempre han cautivado a la humanidad. En ese sentido tal vez no sea casual que el primer libro de la Biblia sea justamente el Génesis. A lo largo del tiempo se desarrollaron diversas teorías cosmológicas y cosmogénicas que intentaron explicar 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 Aristóteles¹, 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 antigüedad¹, 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 publico 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.

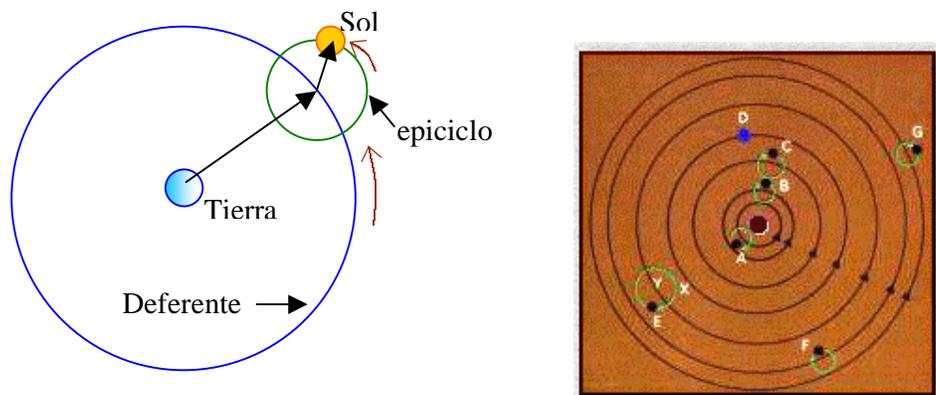


Figura 1. Modelo geocéntrico de Ptolomeo. El diagrama de la izquierda indica el movimiento del Sol. El mismo se mueve sobre un círculo (Epiciclo) cuyo centro a su vez se mueve sobre otro círculo (Deferente). A la derecha se muestra como se mueven el resto de los planetas alrededor de la Tierra siguiendo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

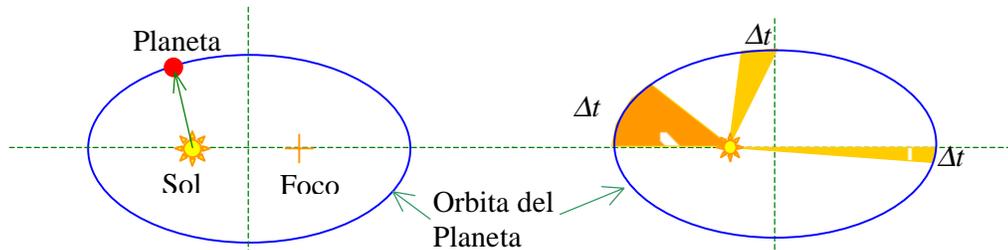


Figura 2. Ilustración esquemática de las dos primeras leyes de Kepler.

- ✓ **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

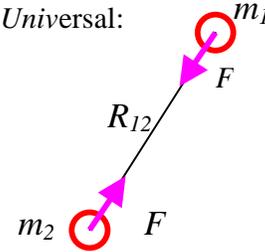
El mundo newtoniano fue sorpresivamente sencillo: utilizando unos pocos conceptos clave: masa, aceleración y fuerza, pudo explicar brillantemente la dinámica del movimiento usando sus tres leyes del movimiento, estas son:

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

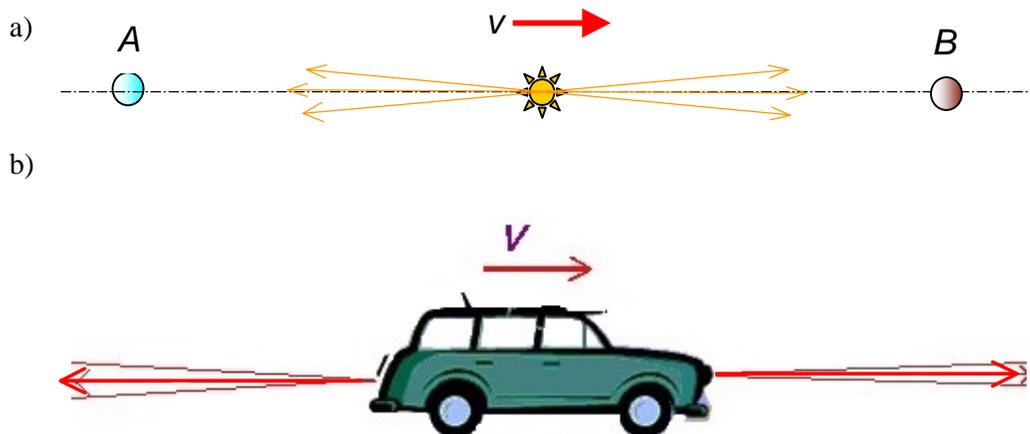


Figura 3. a) Fuente de luz (Estrella) que se mueve con velocidad v hacia la derecha respecto de dos observadores A y B. b) Un móvil (por ejemplo una nave) se mueve a gran velocidad V (con gran velocidad queremos decir una velocidad comparable a la de la luz) y emite dos rayos de luz, uno hacia adelante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

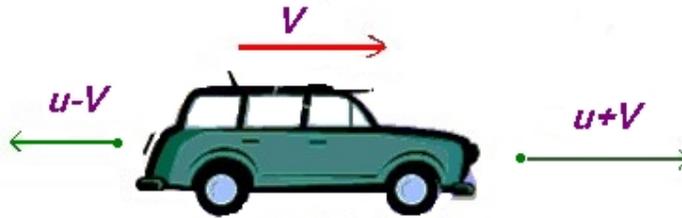


Figura 4. Un móvil se mueve una velocidad V y dispara proyectiles, que salen del arma que las eyecta con una velocidad u relativa a ella. En este caso, las velocidades de los proyectiles respecto al piso se suman algebraicamente como indica la figura.

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.

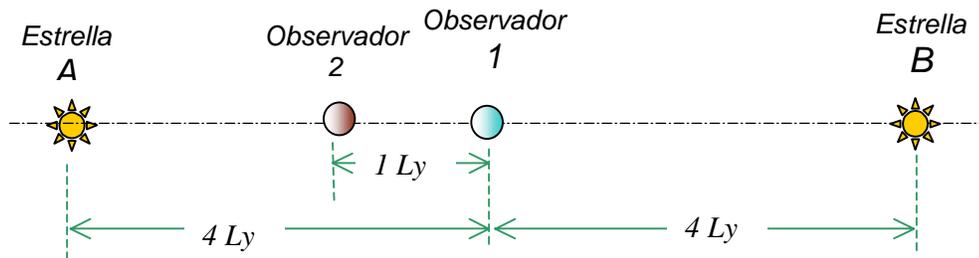


Figura 5. Las estrellas A y B, vistas por el observador 1, distantes de cada una de ellas 4 Ly (Light years = años luz), se apagan simultáneamente. Sin embargo, es claro que no será simultáneo para el observador 2, distante de 1 por 1 Ly. De hecho, el observador 2 notará que la estrella B se apaga dos 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 μ . Por experimentos en el laboratorio, se sabe que la vida media (tiempo entre que los mesones μ 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 μ 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 μ 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 Δm 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.

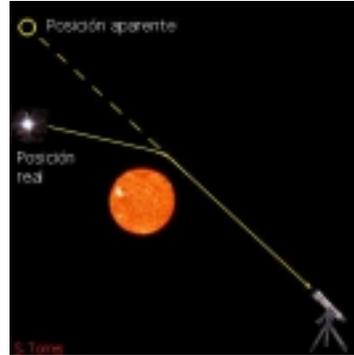
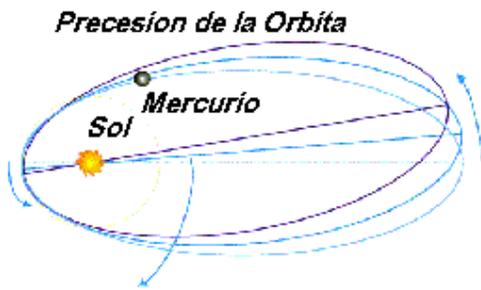


Figura 6. Dos efectos predichos por la teoría general de la relatividad y corroborados experimentalmente. Precesión de la órbita de Mercurio y deflexión de la luz al pasar por un cuerpo masivo, por ejemplo el Sol.

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

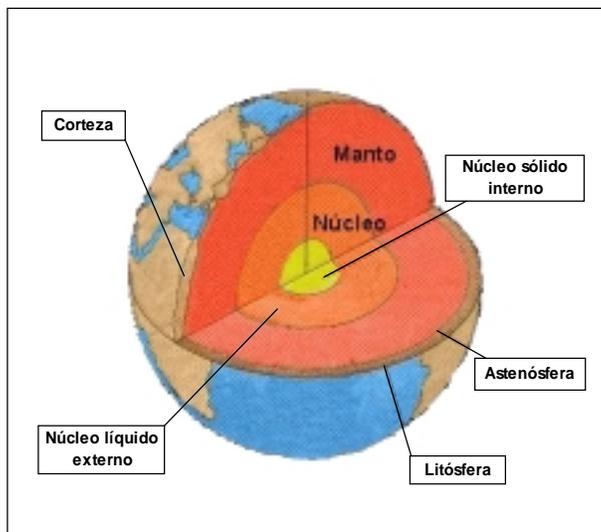
Extensión del tiempo – Edad de la Tierra

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: 5.98×10^{24} kg

Densidad media: 5.5 g/cm³

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.