

# La Olimpiada XXII de Ciencias de la Tierra: El Cosmos y Nuestro Planeta

José Frez y Daniel Peralta

División de ciencias de la Tierra, CICESE, Ensenada, Baja California, México.

## Presentación

En esta ocasión, la División de Ciencias de la Tierra del CICESE consideró pedagógico y de interés general para los estudiantes tratar el tema del entorno en que se sitúa nuestro planeta, el Universo, observado y racionalizado por nuestra civilización. Ello nos lleva a describir la formación de las Ciencias Físicas y Matemáticas, con los primeros modelos desarrollados en la Antigüedad que culmina con los griegos y la Biblioteca de Alejandría. Luego, describimos el desarrollo desde el Renacimiento hasta nuestros días pasando por la solución de

### A. Guía de Estudios

#### 1. Los Comienzos

La especie humana (*homo sapiens*) comenzó lentamente su expansión desde el NO de África hace unos 200,000 años. La escritura se desarrolló unos 7,000 años atrás como consecuencia de las necesidades creadas por el cultivo agrícola. El hombre primitivo pasó del Norte de África al Medio Oriente hace unos 65,000 años, para dispersarse por Europa y Asia. Aventuró lejos de la costa en la parte occidental del Océano Pacífico, cruzó el Estrecho de Bering e incursionó en el continente americano para terminar por poblar toda la superficie de la Tierra. La evolución del ADN transcurre en forma paralela y como resultado del medio ambiente en que los humanos residen por un largo tiempo. De ahí que con las muestras de ADN de restos humanos, se ha logrado establecer la secuencia en tiempo y lugar con la cual nuestra especie terminó por poblar toda la superficie del planeta en un proceso del que resultaron las actuales razas humanas.

#### 1.1. Mitologías

Desde los comienzos de cada civilización, el hombre se preocupó por entender el Universo, su comienzo y su historia. Todos los pueblos tienen ancestrales mitos en los que Universo, Sol, Tierra, Luna, mar y cielo son creados, así como la especie humana. Para sobrepasar esta etapa mágica-mitológica de la cultura, es necesario que el hombre examine evidencias, elabore principios y encare la tarea de entender racionalmente el mundo. En general, todas las culturas tienen un mito sobre la creación simultánea del cielo y la tierra, aunque el hinduismo presenta un proceso cíclico. Por otro lado, el Génesis relata la creación de los cielos y la tierra por el dios hebreo. En la religión griega el universo inicia con el Caos, al que sucede Gea –la Tierra- que, a su vez, engendra a Urano, el firmamento estrellado.

Los aztecas, por su parte y en uno de sus mitos, creían en la existencia de otros mundos anteriores al suyo y que constituyen cinco soles. Después del cuarto, dos dioses –Quetzalcóatl y Tezcatlipoca- recrean el cielo y la tierra desmembrando al monstruo de la tierra. Éste se había combinado con el Gran Caimán, cuya espalda de cocodrilo dio forma a las cadenas de montañas. Después

de peleas y sacrificios, surge Tonatiuh, el quinto Sol. En otra secuencia, un dios dispone que los aztecas emigren desde Aztlán hacia lo que sería Tenochtitlan, la actual Ciudad de México.

## 1.2. Los Inicios en Egipto y Caldea

La civilización se inicia con la agricultura y los comienzos del intercambio comercial. Esto ocurre, para el Occidente, en Egipto y en la Mesopotamia. Tanto el comercio como la agricultura necesitan la aritmética, además de técnicas numéricas, geométricas y, en general, matemáticas. Así, en una etapa inicial, se diseña un sistema numérico que constituye la base de las matemáticas.

Los egipcios dividieron el año en 36 decanos de 10 días cada uno. A estos 360 días, le agregaban cinco días “epagómenos” completando el año de 365 días. Además, reconocían 36 estrellas con posiciones regulares en el cielo y medían el tiempo en 12 unidades nocturnas y 12 diurnas.

La numeración babilónica tiene base 60 de donde nace nuestra división del tiempo en 60 minutos y la circunferencia en  $360^{\circ}$ . Provista de instrumentos para registrar el movimiento de los cuerpos celestes, esta civilización distingue planetas y estrellas, predice las posiciones de los planetas, divide el cielo en las partes del zodiaco y el año en 360 días con 12 meses de 30 días. Además, los babilonios encontraron útil dividir el tiempo en semanas de siete días a los cuales les dieron los nombres del Sol, la Luna y los cinco planetas conocidos. Escriben los números con un sistema posicional muy semejante al actualmente en uso, aunque no tienen un símbolo para el número cero.

Si algo mide la cultura media en cualquier tiempo, es la reacción humana ante los cometas. A pesar de que ya Séneca (4AC – 65DC) dijo: “... porque nos sorprendería que los cometas, ... no estén sujetos a leyes bien determinadas .....

llegará el día en que la posteridad se asombrará de que hayamos ignorado cosas que entonces parecerán tan claras”. Incluso mucho después de ser explicada la existencia de cometas, ellos han producido pánico y suicidios, como sucedió con el cometa Halley en 1910. En 1997, se produjo un suicidio colectivo de 39 seguidores de la secta Puerta del Cielo, a los que les sería permitido abordar una nave que venía junto a un cometa.

## 2. Cosmología y Geografía en la Civilización Antigua Griega

### 2.1. Los Comienzos

Como todas las civilizaciones antiguas, Grecia inicia su cultura con un sistema mitológico de muchos dioses, con uno principal, Zeus, que es posteriormente Júpiter en la versión romana. Los mitos incluyen leyendas relacionadas con el nacimiento del mundo y sus características. El legado, por lo tanto, consta de: a) una mitología muy rica que forma una religión con templos y ritos, además, y al mismo tiempo, de b) los comienzos de la Astronomía y la Geografía. Por ejemplo, la expresión “Vía Láctea” denota al conjunto denso de estrellas que apreciamos a simple vista en un cielo nocturno sin nubes y que corresponde, en el mito, al chorro de leche que saltó del pecho de Hera, la esposa del dios de dioses (Zeus), produciendo la Vía Láctea cuando retiró bruscamente de su pecho a Hércules, hijo bastardo de Zeus con la mortal Alcmena. La historia de la Vía Láctea sigue con Demócrito (460 AC.- 370 AC), quien sugirió que aquel haz blanco en el cielo era, en realidad, un conglomerado de muchísimas estrellas demasiado tenues individualmente como para ser reconocidas a simple vista. Su idea, no obstante, no encuentra respaldo observacional hasta 1609, cuando el astrónomo italiano Galileo Galilei constata, con el telescopio, que Demócrito estaba en lo cierto: a donde quiera que mirase, la Vía Láctea se encontraba llena de estrellas.

## 2.2. Tales de Mileto

La historia de la ciencia griega, en cuanto a aplicar métodos racionales al estudio de la Naturaleza, se inicia con Tales de Mileto (623 AC - 540 AC), filósofo, matemático, geómetra, físico y legislador griego, con una serie de discípulos donde destacan Anaximandro y Anaxímenes (discípulo del anterior). Gran parte de su obra, si no toda, le es asignada sin clara evidencia, pero su fama, propagada a generaciones posteriores, es tan grande que hay poca duda de su importancia histórica. Entre Tales y Demócrito hay cerca de 160 años con pocos registros históricos accesibles. Aunque Demócrito buscaba la causa primordial de las cosas (según él, el agua), no abandonó los dioses de la época. Con todo, no cabe duda de que como Tales, propuso fundar sus explicaciones en principios y causas, inaugurando el modo típicamente griego de “explicar” el mundo. El importante papel de la religión en la cultura griega existe, a pesar del carácter racional de la ciencia y filosofía griega. No hay que olvidar que uno de sus principales filósofos, Sócrates (470 AC – 399 AC), fue condenado a muerte, entre otras cosas, por pecar contra la religión. Murió a los 70 años de edad, aceptando serenamente beber veneno, método elegido por un tribunal que le juzgó por no reconocer a los dioses atenienses y corromper a la juventud. Según relata Platón, en la Apología a su maestro, éste pudo haber eludido la condena gracias a los amigos que aún conservaba, pero prefirió acatarla y morir.

## 2.3. Principales Hitos Culturales de la Antigüedad en Europa

El siguiente listado destaca los principales hitos del comienzo de la ciencia en la antigüedad y alrededor del Mediterráneo.

~585 AC. Tales de Mileto predice el eclipse solar que, históricamente, pone fin a la Batalla de Halys y a la guerra entre medos y lidios.

~530 AC. Pitágoras funda la escuela matemática

de Crotona, en el sur de Italia. Pitágoras sugiere que la Tierra es esférica, no plana.

~500 AC. Jenófanes encuentra conchas marinas en montañas y deduce que toda la Tierra estuvo cubierta de agua en el pasado.

~450 AC. Empédocles sugiere que todo en la Tierra está hecho de combinaciones de tierra, aire, fuego y agua.

~325 AC. Aristóteles escribe varios libros sobre temas de Física, Biología y Zoología. Entre muchos temas, ofrece razones para justificar que la Tierra es aproximadamente esférica (por la manera de cómo se ven llegar o salir los barcos en las bahías) con lo cual se modela los eclipses de la Luna y el Sol.

### Ejercicio

Describe el eclipse de Luna, con la Tierra entre el Sol y la Luna, así como el eclipse de Sol, con la Luna entre la Tierra y el Sol. Para ello, los griegos tomaron al Sol, Tierra y Luna como cuerpos esféricos. En la explicación, tome en cuenta el tamaño aparente de los tres astros.

~300 AC. Teofrasto escribe “Historia de las Plantas” y “Sobre las Causas de las Plantas”. Con ello, inaugura la Botánica.

250 AC. Aristarco de Samos sugiere que el Sol, no la Tierra, es el centro del Universo al encontrar que el radio del Sol es mucho mayor que el de la Tierra.

~240 AC. Arquímedes descubre la fuerza de empuje del agua y lo aplica para distinguir la pureza de una corona de oro.

~240 AC. Eratóstenes calcula el radio de la Tierra (tomada como esfera) a partir de la sombra que produce el Sol a mediodía en el solsticio de verano.

~230 AC. Ctesibio construye clepsidras (relojes de agua) que serán los más precisos del mundo durante siglos.

~139 AC. Hiparco descubre la precesión de la órbita terrestre (¿qué es?) y compila el primer catálogo de estrellas de Occidente.

~120 DC. En China, Zhang Heng reflexiona sobre los eclipses y compila un catálogo de 2500 estrellas.

~150 DC. El Almagesto de Claudio Tolomeo se convierte en el texto de astronomía predominante, pese a los errores que contiene. En este texto, la Tierra está en el centro del Universo con un complicado movimiento de los planetas, la Luna y el Sol (epiciclos) que modela el movimiento observado. Es tomado como verdad absoluta (acorde con la Biblia) por la Iglesia Cristiana e imperará en Europa Occidental hasta el Renacimiento cuando los trabajos de Kepler, Copérnico, Galileo y Newton, entre otros, lo sobrepasan gracias al desarrollo de la Mecánica Clásica y del telescopio.

628. El matemático indio Brahmagupta establece las primeras reglas para el uso del símbolo cero.

964. El astrónomo persa Abd Al-Ramán Al Sufi actualiza el Almagesto y da, a muchas estrellas, los nombres árabes que siguen en uso hoy.

1021. Albacén, pionero de la ciencia experimental, desarrolla una investigación original sobre la visión y la óptica.

Agregamos algunos detalles importantes de la ciencia griega. Particularmente, para describir parte del trabajo de un gigante, Aristarco de Samos (~319 AC - ~230 AC). Además, enfatizamos la importancia de la Biblioteca de Alejandría. El estudiante puede revisar el cálculo para el radio de la Tierra de Eratóstenes que se describe en un olimpiada XIX.

Parte de la ciencia antigua está dominada por consideraciones filosóficas y místicas. Por ejemplo, Empédocles (490-430 AC) hablaba de dos fuerzas (amor y odio) que, aplicadas a los cuatro elementos, generan todo lo visible.

## 2.4 Eratóstenes y la Biblioteca de Alejandría

Mencionaremos dos actividades adicionales de Eratóstenes (276 AC - 184 AC): a) introduce coordenadas en los mapas, semejantes a las actuales latitud y longitud; b) fue director de la famosa Biblioteca de Alejandría. Dicha Biblioteca, hasta sus varias destrucciones (incendios) por celos religiosos y políticos, fue el centro de estudios más importante de la Antigüedad. En ella, investigaban los sabios más sobresalientes, por ejemplo, Euclides y Arquímedes. Su desaparición es un símbolo cultural de la destrucción, la cual ocurrió en varias etapas de los primeros siete siglos de nuestra era. Varias culturas y religiones han sido culpadas. En un último tópico relacionado, no podemos dejar de mencionar a Hypatia de Alejandría.

## 2.5. Hypatia de Alejandría (355 o 370 DC, marzo del 415 o 416)

Es considerada la primera mujer científica de la Antigüedad. Desarrolló su actividad en el Museo de la Biblioteca de Alejandría, donde su padre fue director. Cultivó varias disciplinas como: Filosofía, Matemáticas, Astronomía, Música,... y durante veinte años, se dedicó a desarrollar y enseñar sus conocimientos. Con mucha belleza, llegó a simbolizar la ciencia que los primeros cristianos identificaron con el paganismo. Vivió en una época de persecución para todo aquél que no se convirtiera al cristianismo y renegara de su ciencia. Hypatia se negó a traicionar sus ideas, por lo que fue acusada de conspirar contra el líder cristiano de Alejandría. Fanáticos religiosos, en forma muy cruel, pusieron fin a su vida (la relativamente reciente y recomendable película *Ágora*, dirigida por el español A. Amenábar, recrea parte de esta historia).

## 2.6. Método de Aristarco para determinar la distancia relativa Tierra-Sol

El método geométrico de Aristarco (310 al 230 AC) para determinar la distancia relativa entre la Tierra y el Sol. Este es el único trabajo que sobrevive a su autor. Fue su cuidadosa observación de un eclipse lunar, indicando la posición del Sol en el lado opuesto del cielo, lo que permitió a Hiparco, 169 años más tarde, deducir la precesión de los equinoccios.

La observación de un eclipse lunar convenció a Aristarco, al ver el cambio de la sombra de la Tierra en la Luna, de que el diámetro o radio de la Tierra era el doble que el de la Luna.

En la Figura 1, la Luna (L) está señalada por un semicírculo iluminado que se encuentra dibujado frente al Sol (S). Debajo de la Luna, se encuentra la Tierra (T). Con esta geometría, consideremos que la luz del Sol (S) llega en forma perpendicular a la Luna, cuando ésta se encuentra en el primero o último cuarto; es decir, cuando el ángulo  $\alpha$  es muy cercano a  $90^\circ$ . Note que el problema consiste en calcular la distancia de TS en unidades TL; es decir, calcular la razón  $TL/TS = \cos(\beta)$ . Aristarco encontró que  $\beta = 87^\circ$  con lo que el ángulo interno en el vértice S sería muy pequeño ( $3^\circ$ ). Podemos utilizar que  $\sin(3^\circ) \approx 1/19$ , con lo que resulta que el Sol se encontraría 19 veces más lejos de la Tierra que de la Luna y, por lo tanto, tiene un radio 19 veces mayor. Los resultados actuales son que el radio del Sol es 344 veces el de la Luna.

Ejercicio. Obtenga el ángulo  $\beta$  que esté de acuerdo con el valor 344.

La respuesta a la pregunta anterior indica que el ángulo  $\beta$  está cerca de los  $90^\circ$ , lo que indica que el ángulo interno en S es muy pequeño. Ya que tanto el disco solar como el lunar tienen un diámetro aparente muy semejante, de unos 32 minutos de arco, la distancia Tierra-Sol es mucho mayor que la distancia Tierra-Luna y, por

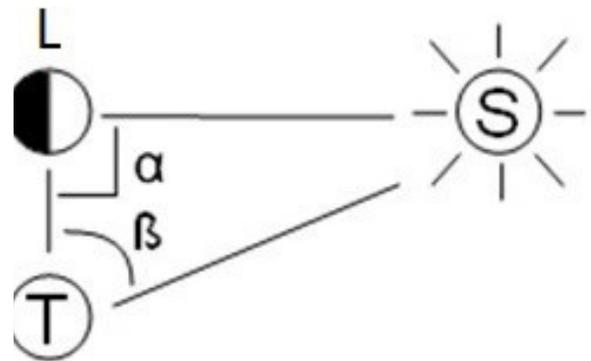


Figura 1. Definición de las distancias Tierra-Sol (TS) y Tierra-Luna (TL) utilizadas por Aristarco. ([https://es.wikipedia.org/wiki/Aristarco\\_de\\_Samos](https://es.wikipedia.org/wiki/Aristarco_de_Samos)).

consiguiente, el Sol debe ser mucho más grande. Al ser el Sol mucho mayor que la Luna, Aristarco creyó improbable que un cuerpo grande orbitara sobre uno mucho menor, siendo el primero en opinar que la Tierra gira alrededor del Sol. Sin embargo, este resultado no fue aceptado hasta el Renacimiento.

El ángulo  $90^\circ - \beta$  es muy difícil de medir con exactitud. El valor que se acepta actualmente es de  $1/6$  de grado con lo que resulta  $\sin(1/6) = 1/344$ .

## 2.7. Edad Media, Renacimiento y Desarrollo Posterior

No hubo un desarrollo significativo de las ciencias durante la Edad Media en Europa y Asia excepto en la Geografía. Hay que esperar al comienzo del Renacimiento para que renaciera la ciencia, el arte, la filosofía y, en general, la cultura en Europa. Seguramente, el estudiante ha estudiado el papel de los imperios Bizantino, de la India y del Árabe en mantener y actualizar los catálogos astronómicos que provienen de la cultura greco-latina de la Antigüedad. No es sorpresa, por tanto, que la Astronomía tenga rápidos y grandes avances por la invención del telescopio, el uso de la información guardada por siglos y el trabajo de Copérnico, Galileo, Kepler y Newton. Los catálogos son la base para inducir las leyes de Kepler y su posterior fusión o síntesis

en la teoría de la gravedad de Newton. Luego, sigue el enorme desarrollo que protagonizan físico-matemáticos como Newton, Laplace, Leibniz y Maxwell para llegar a las explosiones del conocimiento físico desde fines de los siglos XIX y comienzos del XX con los nombres, sin mayor orden, de Dirac, Einstein, Born, Pauli, Poincaré, Eddington, Landau, Chandrasekhar, Gamow, Hoyle, Feynman, Hawking y otros que formaron el conocimiento científico sobre el cual se basa nuestra actual visión del cosmos.

**Física Clásica.** Se inicia con el avance en dos áreas: a) la Mecánica Clásica, formulada a partir de las leyes básicas de la Mecánica, y b) la Teoría de la Gravedad, ambas desarrolladas por Newton. La segunda proviene lógicamente de la síntesis de las leyes de Kepler. Uniendo ambos conjuntos de leyes, fue necesario un desarrollo de métodos matemáticos y numéricos para resolver las ecuaciones en derivadas parciales y su aplicación a problemas como la determinación de las órbitas de planetas, satélites y cometas, trabajo que se realizó básicamente en el siglo XIX. En la segunda parte de este siglo, aparece la teoría del electromagnetismo y la mecánica estadística.

## 2.8. La Historia de las Dos Nubes y el Nacimiento de la Física Moderna

Fue una época optimista en que cualquier problema físico en que se dieran condiciones iniciales y de frontera parecía poderse resolver. Pero, dentro del optimismo de los físicos, uno de ellos, Lord Kelvin, señaló en un discurso de 1900, a dos “nubes”:

*“La física es un conjunto perfectamente armonioso y en lo esencial acabado, en el que sólo veo dos pequeñas nubes oscuras: el resultado negativo del experimento de Michelson y Morley y la catástrofe ultravioleta en la explicación de la radiación del cuerpo negro”*

La falla del experimento de Michelson y Morley se refiere a la falla para detectar el movimiento

de la Tierra relativo al “éter”. La segunda nube proviene de la Mecánica Estadística y tiene que ver con el cálculo (modelado) de la capacidad calórica en gases. El uso de herramientas teóricas estándares (teorema de equi-partición) predecía valores en desacuerdo con los medidos. La solución a la primera nube lleva a Einstein a la teoría de la relatividad; la segunda, a Planck a la teoría cuántica que resolverá este problema, junto con el de la radiación del cuerpo negro, al aplicar correcciones a la teoría clásica. Así las “dos nubes” originaron las dos columnas de la Física Moderna, imprescindibles en el estudio cosmológico.

A lo anterior, se agrega la parte astronómica experimental, con el descubrimiento progresivo de la vastedad del Cosmos, con miles de millones de galaxias compuestas, a su vez, de miles de millones de estrellas acompañadas de sus posibles sistemas solares.

## 3. Principales Resultados de la Cosmología

### 3.1. Corrimiento al Rojo del Espectro de las Galaxias

Esta ley descubierta por Hubble en 1929, en el Observatorio del Monte Wilson, California, señala el corrimiento al rojo del espectro de luz que proviene de las galaxias. La interpretación inmediata es que el Universo se expande ya que las galaxias, de donde quiera que se las mire, muestran este fenómeno y es necesario interpretar el corrimiento al rojo por el efecto Doppler. Este efecto señala el cambio del espectro de una onda emitida por un cuerpo en movimiento; el espectro se corre hacia el extremo violeta/azul del espectro si el movimiento del cuerpo es hacia el observador y tiende al extremo rojo si el movimiento es en la dirección contraria, alejándose del observador. La interpretación de la ley de Hubble es que las galaxias se alejan de un observador en la Tierra. Dado que nuestro observador no puede ser privilegiado, se

concluye que cada galaxia se aleja una de otra y, generalizando, concluimos que el espacio se expande, lo que se cuantifica por la ley de Hubble: las galaxias se alejan una de otras con una velocidad  $v$  que cambia en forma proporcional a la distancia  $d$ . La ley de Hubble se describe como  $v = H_0 * d$ , donde  $v$  es la velocidad de la galaxia cuyo espectro es observado;  $H_0$  es la constante de Hubble, estimada en 71 a 72 km/(seg-Mpsc) y con una variabilidad entre 4 y 8 unidades (Ver las definiciones de distancias astronómicas más abajo). No es difícil deducir, dada la constancia de la velocidad, que ella representa el valor inverso de la edad del Universo. Mediciones recientes indican que la expansión del Universo se está acelerando.

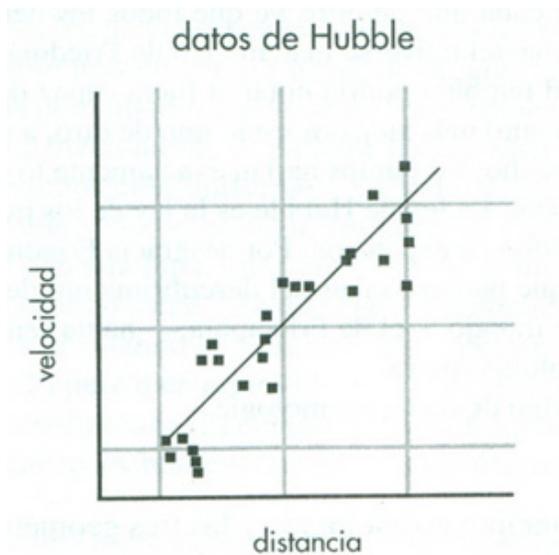


Figura 2. Ajuste lineal de velocidades de alejamientos de galaxias con respecto a la distancia hecho por Hubble. (Susskind, L. (2006) "El Paisaje Cósmico", Crítica, S. L., Barcelona, España).

**Ejercicio.** Suponga la constancia de  $H_0$  en la ley de Hubble, interprete su significado y calcule la edad del universo.

### 3.2. Unidades de Distancias Astronómicas

Las dos más usadas, además de aquéllas de los sistemas [cgs] y [MKS] son:

$$1 \text{ parsec} = 3.083 \times 10^{18} \text{ cm} = 3.259 \text{ año-luz}$$

$$1 \text{ año-luz} = 9.461 \times 10^{17} \text{ cm} = 0.3069 \text{ parsec}$$

Un parsec corresponde a un paralaje (vean más abajo) de un ángulo de un segundo.

### 3.3. Big-Bang

Hubble encuentra que la ley que lleva su nombre implica la expansión del Universo de lo que se infiere que las galaxias estuvieron cada vez más juntas en el pasado, por lo tanto, con una densidad y temperatura muy altas en un momento inicial, es decir, formando lo que los físicos llaman una singularidad. Esto nos lleva al Big-Bang, un origen explosivo de nuestro Universo hace unos 15 mil millones de años. Este resultado ha sido verificado independientemente de un modo curioso. Algunos ingenieros, en un trabajo no relacionado con la Astronomía, encontraron una fuente de radiación de microondas universal que puede asociarse a un cuerpo con una temperatura de 3°K, es decir, la temperatura que habría alcanzado hoy el gas en expansión que resultó del Big Bang. Esta radiación de microondas universal nos permite "oir" reverberaciones de la primigenia "gran explosión".

Existe una gran y muy especializada bibliografía relacionada con el estudio de la evolución de la materia, desde partículas elementales hasta cubrir la serie periódica de elementos. En los primeros instantes, el Bing Bang produjo fundamentalmente partículas elementales, hidrógeno y helio. Las reacciones de fusión en el interior de las estrellas producen todos los demás elementos químicos. Así que, finalmente, la diseminación de los elementos pesados resulta de la explosión de ciertas estrellas, las

supernovas. Dentro de estos elementos pesados, está el muy necesario carbono, imprescindible para la existencia de la vida orgánica. De ahí, el poético dicho: “*somos polvo de estrellas*”.

Las condiciones extremas del comienzo del Universo indican una singularidad en densidad, temperatura, presión y curvatura en que la teoría de Einstein no es adecuada para describir este comienzo puntual del cosmos. La teoría sólo puede estudiar cómo evolucionó posteriormente, dadas las condiciones que los físicos deben imaginar. La primera fase de la expansión, con un factor de  $10^{105}$  veces en un intervalo de tiempo de  $10^{-35}$  seg, parece ya difícil de concebir. Curiosamente, esta situación permitió, según Hawking, que hubiera cierta homogeneidad en este nacimiento. Así, este estudio debe superar las dificultades de combinar física cuántica (pequeñas partículas en extremas condiciones) con física relativista (grandes masas a grandes velocidades). El estado inicial inflacionario debe haber tenido sectores expandiéndose a velocidades mayores que la luz.

El párrafo anterior indica que el estudio del Cosmos necesita especialistas en Física de Partículas. Además, dadas las grandes distancias y masas propias del Cosmos, específicamente las grandes masas asociadas a estrellas, hoyos negros y galaxias, así como sus también (potencialmente) grandes velocidades, nos llevan a concluir que este estudio debe incluir, además, las dos grandes ramas de la Física Moderna, es decir, Relatividad y Física Cuántica. La integración de toda la física incluye nuevos desarrollos teóricos, como la *teoría de cuerdas*. Esta integración, llamada *teoría del todo*, ha sido materia de ardua investigación ocupando las mejores mentes, incluyendo a Einstein y Hawking.

## 4. Conceptos Básicos de Física Moderna

### 4.1 Conceptos (muy) Básicos de Física Relativista

La Relatividad Especial nace del simple hecho de que la velocidad de la luz es constante con respecto a la velocidad del emisor y receptor. Esto parece extraño si el estudiante recuerda la ley del paralelogramo para sumar (o restar) velocidades que se estudia en Estática de la Mecánica Clásica en que, suponiendo que no hay roce del aire (cosa difícil de que se cumpla para objetos que se mueven en la atmósfera), las velocidades se suman vectorialmente. Pero, la velocidad de la luz es la misma para un mismo medio físico, independientemente de la velocidad del emisor. No es difícil concluir que, si invertimos la expansión en el tiempo, deducimos que la materia del Universo debió estar reunida en un espacio muy reducido, sujeta a presiones y temperaturas inmensas. Esto nos lleva a la Gran Explosión, o sea, al popular “Big-Bang”.

### 4.2 Conceptos (muy) Básicos de Física Relativista Especial

Hubo tentativas de medir la velocidad de la luz con respecto al “éter luminífero”, que era considerado el medio en que se transmiten las vibraciones trasversales de la luz. Los resultados fueron negativos. Einstein, a los 26 años, postuló simplemente que esa velocidad es constante y que el “éter luminífero” no existía. Luego, sacó conclusiones de esta hipótesis. Por la definición de velocidad constante, se deduce que el tiempo y la masa pasan a depender del sistema en movimiento.

Otra consecuencia famosa de la constancia de la velocidad de la luz en sistemas inerciales es la equivalencia entre masa y energía  $E=mc^2$ , fórmula atrayente por lo simple, que nos indica el contenido de energía de un cuerpo de masa  $m$  y que nos sirve, por ejemplo, para explicar la cantidad de energía irradiada por el Sol.

En el astro, cuatro núcleos de Hidrógeno se pueden fusionar en un núcleo de Helio. Esta fusión implica menos masa que los núcleos de Hidrógeno; la diferencia se convierte en energía de fusión. En cada segundo, la fusión en el núcleo solar convierte 200 millones de toneladas de hidrógeno en helio. El estudiante puede calcular la energía total liberada por el proceso y hacer un cálculo aproximado de la vida efectiva del Sol. (Además, busque las definiciones básicas de *fusión y fisión*).

### 4.3 Conceptos (muy) Básicos de Física Relativista General

Si la Relatividad Especial se refiere a sistemas con velocidades constantes, la Relatividad General lo es para sistemas acelerados. Lo que cambia mucho la situación porque un sistema acelerado es equivalente a un sistema sujeto a fuerzas. Desde luego, el campo de fuerzas más común en el Universo es el gravitatorio. Este campo lo visualizamos por líneas o superficies equipotenciales que son, al mismo tiempo, geodésicas (*¿qué son geodésicas?*) para partículas masivas; es decir, son el camino natural de las masas en movimiento sujetas al campo gravitatorio. Desde este punto de vista, podemos decir que el campo de fuerzas “curva” el espacio para el movimiento de las cargas gravitatorias. La teoría predice este efecto también para fotones, es decir, para los rayos de luz. En 1919, este último efecto fue observado en un eclipse de Sol por el físico inglés Eddington, quien midió la desviación de los rayos de una estrella al pasar cerca de la periferia y desde detrás del Sol. De aquí viene la discusión de si los fotones tienen masa. Es curiosa la diversidad de opiniones que puede encontrarse en Internet para el tema “¿Tiene masa un fotón?”.

### 4.4 Teoría de Cuerdas

Al unir varias teorías físicas, se busca compatibilizar diferencias. Por ejemplo, puede

pensarse en cómo armonizar la teoría gravitatoria con la mecánica cuántica. Las dificultades originadas pueden incluir la necesidad de espacios multidimensionales, con más de las tres dimensiones que aceptamos habitualmente. Con ello, se consiguen leyes de la naturaleza más sencillas y elegantes. La *teoría de cuerdas* trabaja, como cualquier teoría, con abstracciones matemáticas y se originó para explicar la interacción nuclear fuerte que mantiene unidas las partículas en el núcleo y la conducta de los *hadrones*, partículas compuestas sujetas a la influencia de dicha interacción nuclear. En la teoría de cuerdas, las partículas elementales pueden representarse mediante entes inconcebiblemente pequeños y prácticamente unidimensionales, las cuerdas. Ellas se desplazan en el espacio tridimensional común pero, además, vibran en dimensiones de orden mayor a esas tres. Los modos de vibración (notas musicales) corresponden a las partículas elementales, incluyendo algunas hipotéticas, como los *gravitones*. Para responder la crítica de que las dimensiones extras no son observadas, ellas, además de ser pequeñas, se pueden replegar o “enrollar” como en tubos muy delgados, esencialmente unidimensionales, con dos dimensiones laterales muy pequeñas y enrolladas.

### 4.5 Agujeros Negros y Materia Oscura

Es probable que exista un agujero negro en el centro de nuestra galaxia. Los astrónomos que estudian la radiación que nos llega desde el centro de la galaxia ven un enorme espacio vacío en este centro, libre de gases, pero rodeado de gigantes y caóticos jirones de materia. Por su movimiento, concluyen que existe un masivo objeto en el centro de la galaxia, es decir, *un agujero negro*. Por otro lado, los cálculos de energía en la galaxia sugieren una fuente adicional, la *materia oscura*. Ella ocupa un espacio en los brazos en espiral de nuestra galaxia y se extiende muy afuera de ellos. Se puede hacer balances de energía tomando en cuenta las ondas de radio generadas en esos sitios.

Las fuerzas gravitatorias necesarias para explicar los movimientos observados no corresponden a la distribución de las masas observadas. La fuente de esta fuerza extra necesaria correspondería a una hipotética *materia oscura*.

#### 4.6 Constante Cosmológica y Materia Oscura

Originalmente, Einstein creyó en un universo estático. En 1915, introdujo una fuerza “anti-gravitatoria” que estaba inserta en la estructura del espacio-tiempo. Cuando se concluyó que el universo no es estático, Einstein eliminó dicha fuerza de su teoría y llamó a su idea “el error más grande” que había cometido. Sin embargo, en 1998, las observaciones de supernovas muy distantes revelaron que el universo se está expandiendo a un ritmo muy acelerado y la constante cosmológica fue resucitada como fuerza anti-gravitante con un valor justo para evitar que el universo se hubiera disgregado antes de la formación de las galaxias.

### 5. Medición de la Distancia de Nuestro Sistema Solar a Una Estrella. Método del Paralaje

Una forma de atacar este problema es generalizar el método geométrico utilizado por los griegos para calcular la distancia Tierra-Sol en unidades de la distancia Tierra-Luna (Sección 2.6). Esto, nos lleva al método del paralaje. Aunque existen otros, en estas notas nos limitaremos a este método. Dada las enormes distancias a las estrellas, es fácil predecir que necesitamos triangular con distancias del orden de la órbita de la Tierra. La geometría del método está representada en la Figura 3.

Tomamos como base los dos puntos que limitan al eje mayor de la órbita de la Tierra alrededor del Sol. Unimos estos dos puntos con la estrella que, necesariamente, se encuentra a una distancia mucho más grande que las dimensiones de la

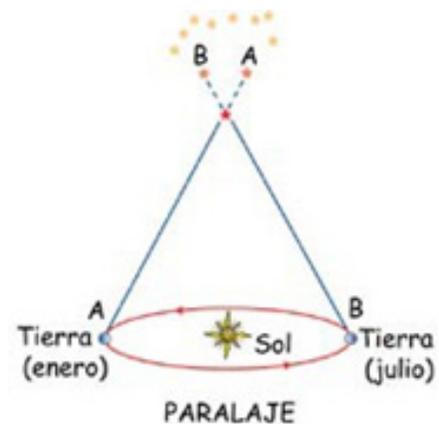


Figura 3. Geometría utilizada para definir paralaje (<https://ciencia.amateur.wordpress.com/2006/04/12/calculo-de-la-distancia-a-las-estrellas-usando-paralaje-trigonometrico/>).

órbita de la Tierra. Esto produce un triángulo que, para simplificar, suponemos isósceles. Medimos el ángulo interno del vértice en la estrella. Además de este muy pequeño ángulo, que llamamos paralaje, conocemos al ángulo recto y la longitud del eje mayor de la órbita de la Tierra. La distancia del centro de nuestra órbita a la estrella es la longitud de la altura del triángulo isósceles. Con la aproximación anotada, la paralaje se mide a través de su tangente que es la razón entre el semieje mayor de la órbita de la Tierra y la distancia desde la estrella al centro del plano de la órbita de la Tierra. Los valores comúnmente medidos resultan ser del orden de segundos de arco. Un parsec se define como la distancia estelar que corresponde a 1 segundo del arco de paralaje.

## 6. Temas Diversos

### 6.1. Cosmología y Ciencia Ficción

Abundan películas y libros de ciencia ficción con temas, entre otros, de invasión de extraterrestres, viajes espaciales con hibernación, extra dimensiones espaciales y “gusanos” que “cortan”

caminos a través de la curvatura del espacio. El estudiante que desea considerar la viabilidad del tema de viajes intergalácticos puede tomar en cuenta lo siguiente.

Las estrellas más cercanas están a distancias del orden de años-luz.

1 año-luz = 9,460,730,472,580.8 Km = distancia que recorre la luz en un año.

Radio de nuestra galaxia ~ 50 años luz

Distancia de la Tierra a la Galaxia Andrómeda (visible a simple vista) ~2.5 millones de años luz.

Dentro de 4,000 millones de años, Andrómeda entrará en colisión con nuestra galaxia, la Vía Láctea.

Distancia a la Galaxia del Molinete ~ 25 millones de años luz.

Las dos galaxias anteriores son muy “cercanas” a la nuestra. Con lo cual, si adjudicamos una velocidad realista al cohete espacial, se puede introducir un toque de sensatez en los cálculos del tiempo necesario para un viaje espacial intergaláctico. Por ejemplo, calcule el tiempo de recorrido desde nuestro planeta a uno de Andrómeda con un vehículo espacial que se mueve a un 10% de la velocidad de la luz, ambos planetas están cerca del centro de ambas galaxias muy cercanas entre sí.

## 6.2. Espacios Multidimensionales

Este tema es utilizado en ciencia-ficción en forma lejana a su uso normal en Física. Ya hemos mencionado que varias áreas de la Física suelen necesitar espacios multidimensionales para poder formar construcciones teóricas que avancen hacia una “teoría del todo”. Por ejemplo, para compaginar diversas teorías (por decir, gravedad relativista con teoría cuántica) en

un solo cuerpo, puede que algunas necesarias igualaciones analíticas requieran la introducción de espacios de seis o más dimensiones.

## 6.3. El Lugar del Hombre en el Universo

Vivimos en nuestro Universo en que los elementos químicos se construyeron secuencialmente después del Bing Bang. Quizás en uno de un conjunto de posibles multiversos. Habitamos un planeta con un Sol adecuado y una distancia adecuada de él, en que el agua de los océanos formó un caldo de cultivo que, hace unos 400 millones de años, permitió el apareamiento y la evolución de seres orgánicos. Vivimos en un planeta que no tuvo catástrofes, ni supernovas cercanas que explotaran y destrozaran los intentos de vida. ¿Una casualidad entre millones de sistemas solares semejantes sin vida?

Los que apoyan la teoría del “*gran diseño*” alegan demasiada coincidencia con muy pequeña probabilidad de existencia. Los que ven la evolución del Cosmos como un resultado “natural” entre millones de posibilidades alegan, como Laplace, “no necesitamos esa hipótesis” (la del gran diseño) y muestran el hecho frío de que todo lo que sucede es poco probable porque hay demasiadas posibilidades.

Lo cierto es que el estudio del Universo, o de “nuestro” Cosmos, ofrece una visión que nos obliga a aceptar y visualizar con admiración la complejidad natural de la evolución física, biológica y espiritual en nuestro cosmos y nuestro planeta y, si volvemos al comienzo de estas Notas, cuando seguimos, también con admiración, al desarrollo del conocimiento de la naturaleza que nace en una isla del Mediterráneo, con un Tales de Mileto y hace 2,600 años.

## B. Problemas

1. El avance de las Ciencias Naturales y las Matemáticas en la Antigüedad resultan principalmente de:

- a) la necesidad de entender las causas de los fenómenos naturales;
- b) de reemplazar la acción de dioses por un conocimiento empírico-racional;
- c) prever lo que sucederá en la evolución del hombre;
- d) la labor del Estado en la educación.

2. Los principios que sostienen una estructura teórica en Ciencias Naturales son:

- a) una estructura social que sostiene la educación con impuestos;
- b) sentencias muy generales que provienen de la experiencia, se toman como ciertas y de las cuales pueden deducirse consecuencias;
- c) los comienzos del Universo de acuerdo a alguna mitología;
- d) los valores éticos a los cuales  $\beta$  debe ajustarse el investigador.

3. Una masa de 10 gr es equivalente en energía a:

- a)  $3 \cdot 1,025$  [erg];
- b)  $9.5 \cdot 1,030$  [erg];
- c)  $9 \cdot 1,021$  [erg];
- d) infinita energía, según la teoría de la relatividad especial. Tome la velocidad de la luz como 300,000 [km/seg].

4. Un Universo surgido de un Big Bang está en estado de expansión por el efecto de un tipo de materia llamada:

- a) fuerza negra;
- b) hoyo negro;
- c) materia oscura;
- d) agujeros negros.

5. En la física de la mayor parte del siglo XIX, el éter era:

- a) un gas que permite realizar cirugía con comodidad;
- b) un medio en el que vibran las ondas sonoras;
- c) una materia misteriosa que producía enormes campos gravitacionales;
- d) medio en que vibran las ondas luminosas.

6. Los hombres primitivos salieron inicialmente de la época recolectora y cazadora gracias a:

- a) la agricultura, en sitios con ríos de fuerte caudal que arrastraban sedimentos;
- b) el comercio en puertos abrigados y bien protegidos;
- c) el estar cerca de la ruta del tráfico comercial con el Oriente;
- d) la inteligencia de pensadores excepcionales.

7. Los grandes pensadores griegos de los primeros siglos de nuestra era recibían invitaciones para investigar en:

- a) en imperios del extremo Oriente altamente evolucionados;
- b) la Biblioteca de Alejandría;
- c) las escuelas fundadas por Sócrates, Platón y Aristóteles en Atenas;
- d) el Coliseo Romano.

8. La visión de que la Tierra es plana fue aceptada por:

- a) Grecia en los primeros siglos de nuestra era;
- b) las autoridades en la Edad Media;
- c) la posición oficial de la Iglesia Católica Romana en la edad contemporánea;
- d) Copérnico.

9. La teoría del Big Bang nace:

- a) como consecuencia de la ley de corrimiento al rojo de los espectros de la luz que provienen de estrellas de galaxias lejanas;
- b) porque el Universo se expande y contrae periódicamente;
- c) de las observaciones por telescopio hechas por Galileo;
- d) de los principios de la relatividad especial.

10. Modelos de universos multidimensionales:

- a) son sólo propios de la literatura de ciencia ficción;
- b) pueden aparecer en teorías físicas que tratan de conjuntar lógicamente diversas teorías modernas;
- c) aparecen sólo en la teoría de la relatividad general;
- d) son necesarios para permitir viajes entre galaxias.

11. La ley de Hubble se escribe como  $v=H_0 \cdot d$  donde  $v$  es la velocidad del alejamiento entre galaxias,  $d$  es la distancia del alejamiento y  $H_0$  es la constante correspondiente. Luego,  $H_0$ :

- a) no tiene dimensión física;
- b) es la distancia a la galaxia más cercana;
- c) el valor inverso de un tiempo, la edad del Universo;
- d) no tiene significación física.

12. Podemos medir la distancia desde nuestro sistema solar a una estrella lo que consiste en armar un triángulo isósceles en que:

- a) el valor de un semieje de la rotación de la Tierra es la base;
- b) el ángulo del vértice opuesto a la base es medible;
- c) hay que esperar muchos años para estimar la distancia;
- d) no se puede medir las distancias a estrellas de

otras galaxias.

13. La detección de la presencia de vida inteligente en un planeta de otro sistema solar en otras galaxias del universo:

- a) no es posible por las enormes distancias;
- b) no es posible porque somos únicos en el cosmos;
- c) es probable, pero sólo detectable con herramientas de alta tecnología;
- d) hay claras evidencias de visitas de seres inteligentes a nuestro planeta.

14. Es común hablar de una "singularidad" en teorías del Universo. Esto significa:

- a) una probabilidad extremadamente pequeña de la existencia de los elementos más pesados en los primeros segundos de vida del Cosmos;
- b) el carácter "único" del Cosmos porque es poco probable que haya resultado de un proceso natural;
- c) el valor extremadamente pequeño del tamaño del cosmos en el momento del Big Bang;
- d) el hecho de que se hayan producido elementos muy livianos casi inmediatamente después del Big Bang.

15. Para teorizar sobre la evolución del Cosmos, es necesario conjuntar teorías relativistas y cuánticas además de teoría de física de partículas en condiciones de alta temperatura, curvatura y presión. El resultado:

- a) no es aceptado para la mayoría de los científicos;
- b) es un edificio enorme y altamente aceptado por la comunidad científica internacional;
- c) no explica la evolución de la vida inteligente;
- d) los resultados no están sujetos a adicionales mejoras desde el punto de vista teórico u observacional.

16. La relación entre energía y masa es:

- a) un resultado experimental de la Física de Altas Energías;
- b) una consecuencia de los principios de la relatividad especial;
- c) un resultado empírico de masas en movimiento;
- d) una hipótesis altamente probable.

17. Es un hecho de que, en la Antigüedad, los científicos aceptaron evidencias que muestran que la Tierra es (aproximadamente) esférica y gira alrededor del Sol mientras que la Luna lo hace alrededor de la Tierra. Estos resultados no se aceptaron en las varias centenas de años siguientes lo que muestra que:

- a) la ciencia ofrece un conocimiento sólo probable;
- b) pueden existir regímenes políticos en que prevalecen consideraciones ideológicas extra-científicas;
- c) la evolución de la ciencia es impredecible;
- d) la ciencia y la tecnología no ofrecen felicidad.

18. Los cálculos de Aristarco permiten estimar la distancia Tierra-Sol en 22 (en realidad, son 400) unidades de la distancia Tierra-Luna. Aunque el error es bastante grande, una consecuencia cierta es que el tamaño del Sol es muchas veces más grande que el de la Luna porque:

- a) el Sol produce mucho más calor comparado con la Luna;
- b) el tamaño aparente de ambos cuerpos y observable desde la Tierra es muy semejante, pero a distancias muy disímiles;
- c) podemos observar características de la Luna a simple vista;
- d) la Tierra es el centro del Universo.

19. El efecto Doppler indica que las ondas generadas por un emisor en movimiento disminuyen su período de oscilación en la dirección del movimiento y las aumenta en la dirección contraria. Por lo tanto:

- a) el pitido de una locomotora será más agudo en la dirección del movimiento y más grave en la dirección contraria;
- b) el efecto es exactamente contrario: suena más agudo cuando la locomotora se aleja;
- c) el efecto Doppler no afecta nuestra percepción del sonido de la locomotora en movimiento;
- d) lo afecta, pero se necesita un aparato especial para percibirlo.

20. Señale, dentro de las opciones listadas, lo que le parezca más claramente apoyado por la evidencia empírica de la Física:

- a) la historia de nuestro Universo comienza con una Gran Explosión y no podemos afirmar nada de su historia antes de esta explosión;
- b) el Universo pasa por estados alternativos de explosiones y de implosiones;
- c) la secuencia de explosiones e implosiones dura eternamente;
- d) pero con menos intensidad y duración.

21. En mecánica, los principios más generales fueron determinados por:

- a) Aristóteles, quien trató de entender la causa del movimiento de los cuerpos;
- b) por Kepler, quien encontró las leyes que determinan el movimiento de los planetas;
- c) por Newton, quien determinó que es necesario encontrar la fuerza que produce aceleración de las masas afectadas;
- d) por Maxwell, quien generalizó las leyes básicas del electromagnetismo.

22. La teoría de cuerdas describe las partículas elementales como:

- a) masas muy pequeñas con cargas eléctricas;
- b) masas constituyentes del átomo y del núcleo;
- c) elementos químicos que resultan del Big Bang;
- d) oscilaciones de entes elementales muy pequeños que vibran en espacios de más de tres dimensiones.

23. Además de principios, basados en una generalización del conocimiento empírico, la estructura de la ciencia necesita formalmente para su desarrollo teórico:

- a) intuición para poder imaginar la existencia de entes muy abstractos que explican el Universo;
- b) lógica y matemáticas;
- c) apoyo financiero;
- d) una actitud de admiración por la belleza del Universo.

24. El pensamiento mágico del hombre primitivo creaba entes responsables del acontecer de la Naturaleza:

- a) este pensamiento ha sido eliminado totalmente de la cultura humana;
- b) forma una parte permanente y eterna de la conciencia de gente ignorante;
- c) es tomado por el Arte como forma de describir poéticamente la Naturaleza y la Sociedad;
- d) es sólo parte de la literatura infantil.

25. Un hoyo negro, como una masa concentrada espacialmente y altamente densa que, por lo tanto, absorbe a cualquier otro cuerpo masivo que esté en su cercanía:

- a) es de existencia dudosa ya que implica la absorción de posibles observadores cercanos;
- b) corresponde al estado de masa antes de un Big Bang;
- c) es sólo un tema de ciencia ficción;
- d) ha sido detectado con gran probabilidad en el

centro de nuestra galaxia.

### **Agradecimientos.**

Agradecemos la revisión del contenido y texto de la Guía de Estudio realizada por el Dr. Enrique Gómez T. y Cristina Álvarez. También agradecemos al L.I. Humberto Benítez, quien estuvo a cargo del diseño y logística del evento.