

“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 critica del Universo](#)
- ✓ [Descubrimientos recientes – Materia oscura y energía oscura](#)
- ✓ [Conclusiones](#)
- ✓ [Bibliografía](#)
- ✓ [Referencias de Cosmología en la Web](#)

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

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

Comprensión de la naturaleza del fuego

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

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

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

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

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

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

Otra razón para la aceptación de la nueva química fue que, después de leer las publicaciones de Lavoisier, ésta encajaba bien con la teoría atómica desarrollada por el científico inglés John Dalton. Este último pulió y refinó las viejas ideas griegas de elemento, compuesto, átomo y molécula, conceptos que Lavoisier había incorporado a su

sistema. Este mecanismo para desarrollar combinaciones químicas le dio aún más especificidad al sistema de principios de Lavoisier. Proveyó las bases para expresar el comportamiento químico en términos cuantitativos.

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

En los tres últimos siglos, desde Lavoisier y Dalton, el sistema se ha ampliado mucho para explicar la configuración que adoptan los átomos cuando se unen entre sí y para describir su funcionamiento interno que da cuenta de por qué se unen como lo hacen.

División del átomo

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

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

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

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

Pero la historia del uranio estaba lejos de terminar. Justo antes de la Segunda Guerra Mundial, varios científicos alemanes y austriacos demostraron que cuando el uranio es irradiado con neutrones, se parte en dos fragmentos que tienen aproximadamente la mitad de la masa atómica de éste. Estos físicos estuvieron poco dispuestos a aceptar lo que ahora parece la conclusión obvia: que el núcleo de uranio había sido inducido a separarse en dos núcleos mas pequeños, casi iguales. Esta conclusión pronto fue propuesta por la fisicomatemática austriaca Lise Meitner y su sobrino Otto Frisch, quienes introdujeron el término "*fisión*". Ellos notaron que si los productos de la fisión juntos tenían menos masa que el átomo original de uranio, entonces podían liberarse enormes cantidades de energía, lo cual era compatible con la teoría de la relatividad especial de Einstein.



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

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

Aprovechamiento de la energía

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

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

El motor de la revolución industrial fue la invención y el mejoramiento de la máquina de vapor. Este es un dispositivo para transformar la energía química en trabajo mecánico: se quema combustible y el calor que desprende es utilizado para convertir agua en vapor, el cual es empleado a su vez para impulsar ruedas o palancas. Las máquinas de vapor fueron desarrolladas al principio por inventores en respuesta a la necesidad práctica de bombear agua de las inundaciones en las minas de carbón y minerales. Después de que el inventor escocés James Watt perfeccionó en gran medida la máquina de vapor, se utilizó rápidamente para impulsar máquinas en las fábricas; para mover carbón de las minas y para dar fuerza a las locomotoras, barcos y los primeros automóviles.

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

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

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

vidas. En grado considerable, las ideologías políticas principales del siglo XX surgieron de las manifestaciones económicas de la revolución industrial.

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

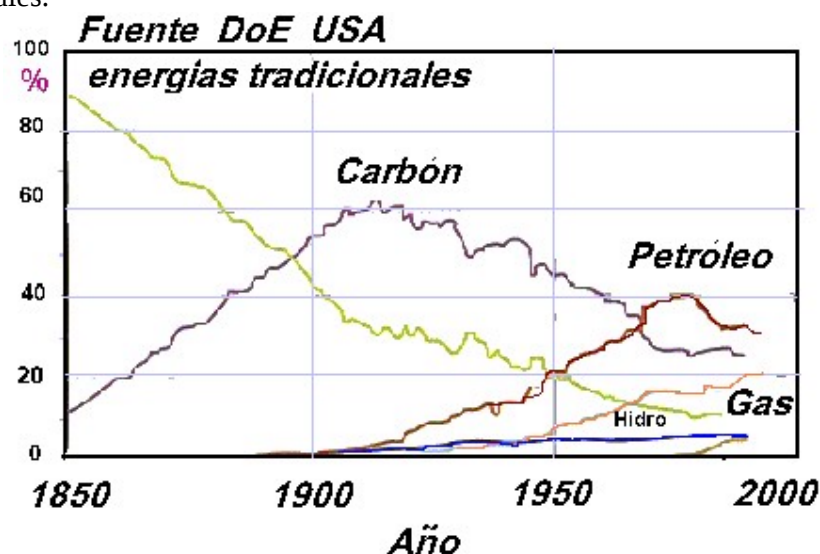


Figura 8. Evolución del uso de recursos energéticos a lo largo de la historia. Los recursos tradicionales son la madera, que era el combustible dominante antes de la revolución industrial, cuya primera fase tuvo como combustible el carbón. La segunda etapa de la revolución industrial estuvo dominada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

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

Calendario de Carl Sagan

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

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

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

Calendario

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

31 de Diciembre 24:00 Tiempo presente.

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

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

Las distancias que nos separan de los planetas y las estrellas son tan grandes que es imposible usar las unidades de longitud terrestres como el kilómetro o la milla para medirlas en su totalidad sin enredarnos con cifras exageradamente grandes y nada prácticas. Se utilizan en cambio unidades más grandes que nos permiten conceptualizar de manera óptima estas inmensidades. Una de ellas es el año luz, que equivale aproximadamente a 9 billones de kilómetros de longitud. Corresponde al tiempo que demora la luz para recorrer dicha distancia y es útil para localizar objetos lejanos como galaxias, cúmulos estelares y quasares. Otra unidad de medida es la unidad astronómica (U.A.) que corresponde a la distancia que separa la Tierra del Sol y equivale aproximadamente a 150 millones de kilómetros. Es utilizado frecuentemente para las mediciones dentro de nuestro sistema solar.

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

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

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

hidrógeno en un factor de 10^{13} , el núcleo del átomo sería una esfera de unos 10 cm. El electrón, que tendrían también el mismo tamaño que el núcleo, estaría a unos 500 metros. Todo el átomo, sería una esfera de unos 500 metros. De nuevo vemos que el volumen atómico hay una gran cantidad de espacio vacío.

Desarrollo de la cosmología astrofísica en el siglo XX

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

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

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

¿ Qué cosa es una onda?

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

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

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

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

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

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

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

o bien

$$C = f \cdot \lambda \quad (10)$$

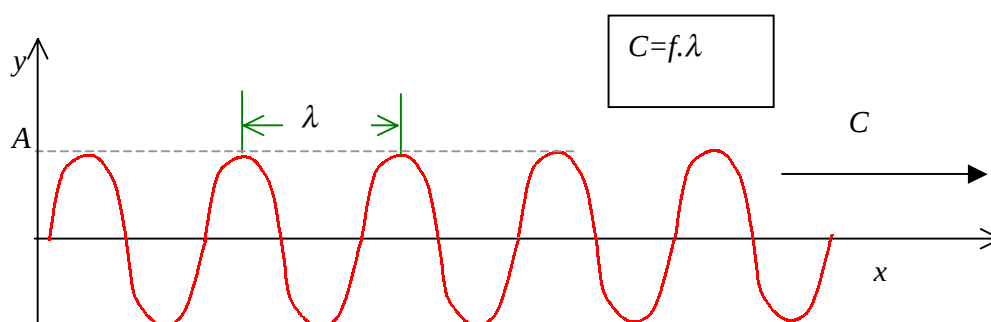


Figura 9. Diagrama esquemático de una onda viajera, en un dado instante t , cuya velocidad de propagación llamamos C .

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

Efecto Doppler



Seguramente, en la calle hemos escuchado el sonido de la sirena de una ambulancia que pasa cerca nuestro. Probablemente recordaremos como va cambiando el sonido a medida que la ambulancia se nos acerca, especialmente el cambio del tono, justamente al momento de pasarnos. Al pasar el vehículo se nota un claro cambio en altura o tonalidad del sonido, pasando de un sonido agudo a otro más grave. Si hubiésemos viajado en la ambulancia no hubiéramos observado este cambio. Cuando una fuente de sonido en movimiento se nos acerca, apreciamos un aumento en la frecuencia. El tono nos parece más agudo. En cambio si se nos aleja, disminuye (ver figuras 10 y 11).

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

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

En resumen:

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

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

O bien

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

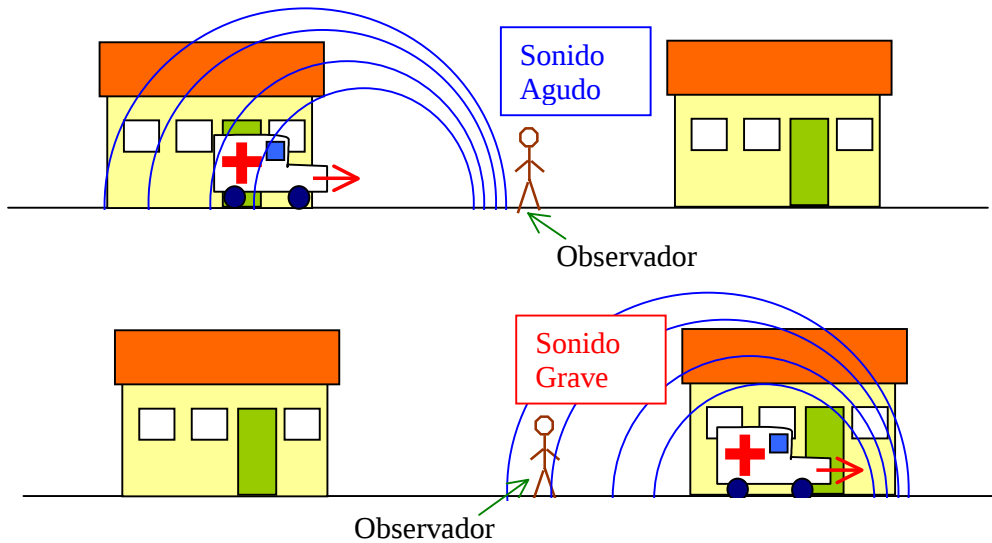


Figura 10. Una persona en la calle oye el sonido de una sirena cuando pasa una ambulancia, Lo mismo ocurre si la persona está en una estación viendo pasar un tren con su bocina sonando. El sonido es más agudo cuando la ambulancia (o el tren) se acerca y más grave cuando se aleja. En cambio el conductor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

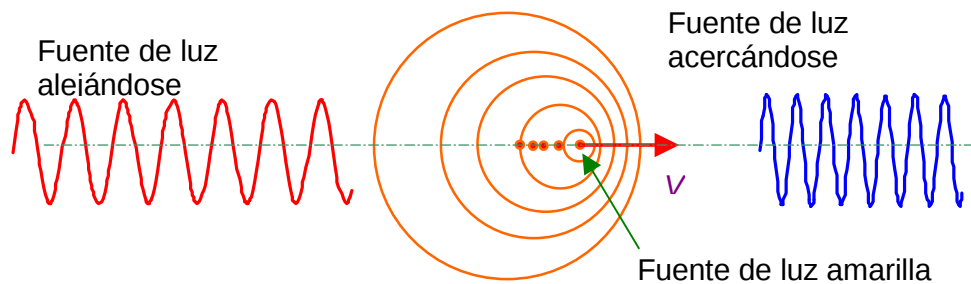


Figura 11. Aquí vemos una fuente de luz amarilla moviéndose a velocidades cercanas a la luz hacia la derecha. Los observadores estacionarios (en el sistema de referencia elegido) a la izquierda, ven la fuente alejándose y su color (frecuencia) se enrojece (disminuye la frecuencia). En cambio los observadores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

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

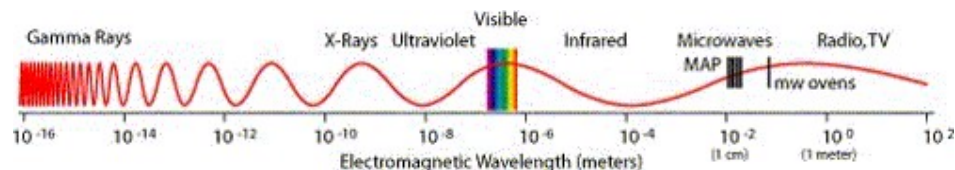


Figura 12. Espectro de la radiación electromagnética. En el eje horizontal están representadas las longitudes de onda (λ) de la radiación. La frecuencia aumenta hacia la izquierda. A muy cortas longitudes de onda tenemos los rayos gamma, por otro lado para grandes longitudes de onda tenemos las ondas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

Radiación del cuerpo negro

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

En la Figura 13 se presentan los espectros de radiación de un cuerpo (negro) a distintas temperatura absoluta (la temperatura absoluta es la temperatura en grados centígrado más 273, sus unidades son grados Kelvin, o sea $T_{\text{absoluto}} [\text{K}] = T [^{\circ}\text{C}] + 273.15$). Si la radiación de un cuerpo caliente, llamado comúnmente “cuerpo negro”, se hace pasar por un prisma, la misma se descompone en distintas frecuencias (colores). Vemos que a medida que aumenta la temperatura, el área de las curvas de la Figura 13 aumenta rápidamente (esto es la energía total emitida por unidad de tiempo). Además notamos que el máximo de la curva, representado por las flechas verticales, se va corriendo a frecuencias mayores a medida que aumenta la temperatura. Se puede escribir una relación entre la frecuencia de máxima radiación para cada temperatura. Esta relación se llama ley de Wien:

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

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

detectar, por ejemplo un cáncer, ya que los tejidos cancerosos tienen una temperatura levemente mayor a los sanos.

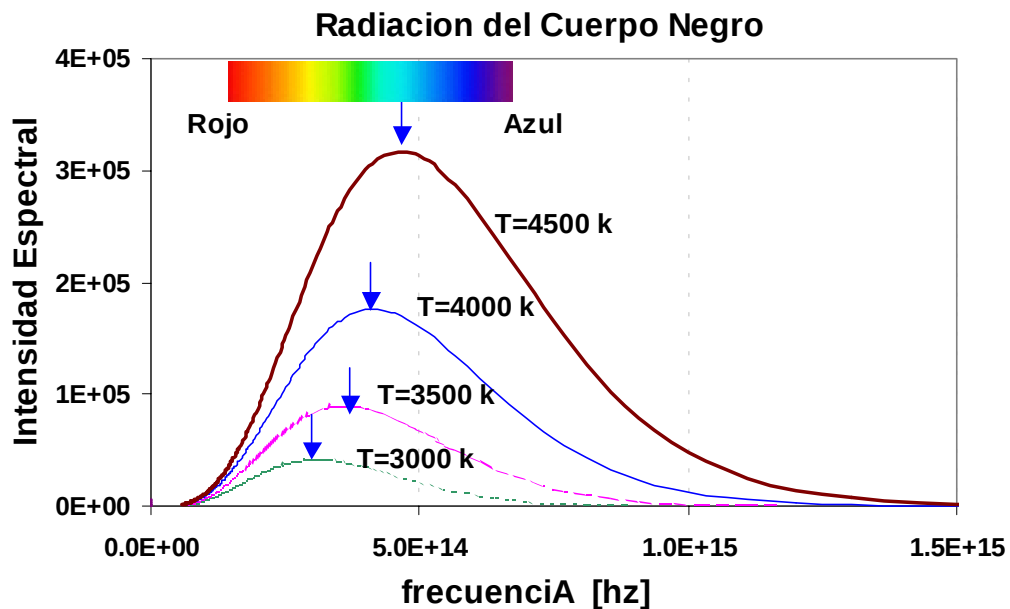
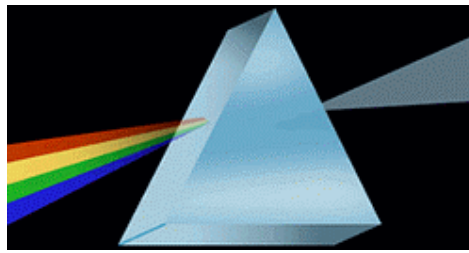


Figura 13. Espectro de la radiación electromagnética de un cuerpo negro a distintas temperaturas. Las flechas indican la posición del máximo de radiación a cada temperatura. Arriba se muestra como al pasar un haz de luz blanca, por ejemplo proveniente de una fuente incandescente, al pasar por un prisma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

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

Variación de la temperatura en la expansión de un gas

Posiblemente todos hemos experimentado el hecho de que cuando inflamamos la rueda de una bicicleta con un inflador manual, el extremo del mismo, por donde sale el aire, se calienta. Este fenómeno ocurre toda vez que se comprime un gas sin que entre o salga energía del sistema (proceso adiabático). Por ejemplo, en el caso del inflador, la compresión ocurre rápidamente y no da tiempo para que se intercambie energía con el medio. Este proceso es reversible, es decir si se expande el gas, el mismo se enfría. De

hecho, un refrigerador funciona gracias a este principio. Un gas comprimido por el compresor de la heladera, se descomprime rápidamente en la región del congelador, enfriándose y tomando calor del medio. Este mismo principio opera en gran escala en el Universo. A medida que el Universo se expande, el mismo se va enfriando. Podemos determinar la temperatura media del Universo, midiendo la radiación electromagnética de fondo. En las secciones que siguen investigaremos este efecto en más detalle.

Abundancia de los elementos en el Universo Nucleosíntesis

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

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

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

Paradoja de Olber

Otra objeción a la teoría del Universo estático e infinito es la existencia de la noche, objeción conocida como paradoja de Olber. Si el Universo fuese estático (no se expande ni colapsa) también debería ser infinito. De este modo la fuerza gravitatoria sobre cada región del Universo sería en promedio nula y esto prevendría el colapso gravitatorio. También se pensaba que el Universo era eterno, o sea que siempre habría existido como ahora, incluyendo los elementos que lo forman. Actualmente sabemos que estas teorías tienen varias objeciones serias. Si el Universo fuese eterno (siempre existió) e infinito,

todos las visuales trazadas desde la Tierra eventualmente encontrarían una estrella, de modo que el cielo de noche debería ser tan brillante como la superficie del Sol. ¡Sin embargo sabemos que la noche existe!

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

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

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

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

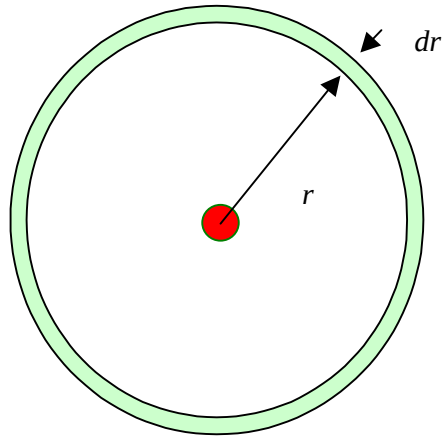


Figura 14. Cascarón esférico de radio r y espesor dr centrado en un observador ubicado en la Tierra, que está en el centro.

Las noches son oscuras porque el Universo no es eterno!

Si suponemos que el Universo es infinito y siempre existió, debemos tomar $r_{max} = \infty$, con lo cual $I \rightarrow \infty$, que es justamente la paradoja de Olber. Nótese que esta divergencia subsiste para cualquier valor de n y $\langle P \rangle$. El origen de esta divergencia está asociada a $r_{max} \rightarrow \infty$. ¿Cómo podría solucionarse este problema?. Vemos que si el Universo fuese finito en tiempo, es decir si existiera un “horizonte” en tiempo T_{horiz} , tal que las estrellas que “vemos” son sólo aquellas que están dentro de la esfera de radio $R_{horiz} = c \cdot T_{horiz}$ (c es la velocidad de la luz), entonces en la expresión (13) debemos asociar $r_{max} = R_{horiz}$ y la divergencia quedaría salvada. Es interesante notar que la posible absorción que podrían

producir partículas entre la Tierra y las estrellas, que forman el medio interestelar, no resuelve el problema de la divergencia en la intensidad. En un Universo eterno, este material interestelar estaría en equilibrio térmico con la radiación que recibe y emitiría tanto como absorbe. De este modo, este material interestelar sería tan brillante como las estrellas, lo cual hace que la absorción sea irrelevante y el problema de la divergencia aun subsistiría.

El Principio Cosmológico

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

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

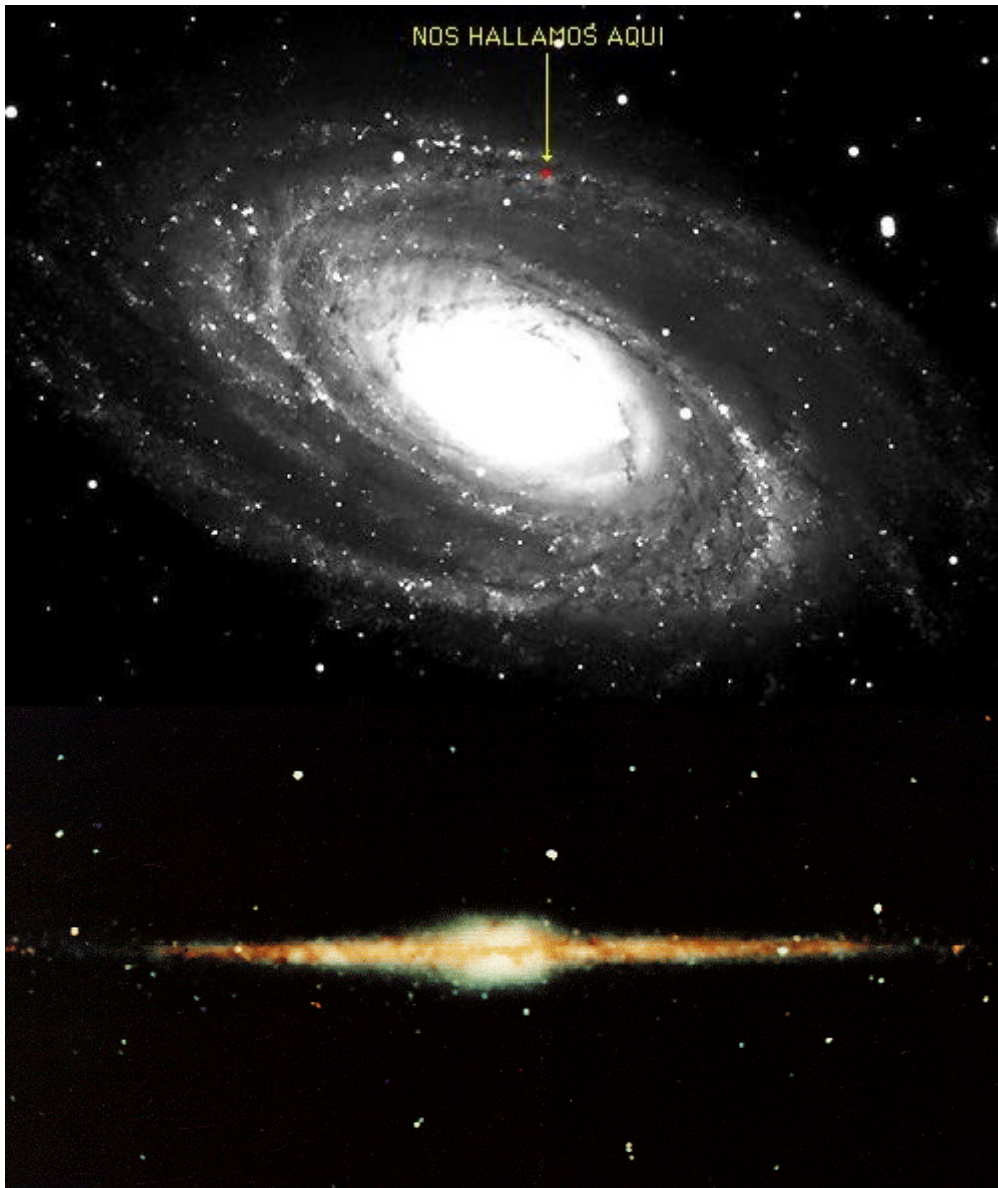


Figura 15. Dos vista de la Vía Láctea. La superior es una foto de una Galaxia que se parece a la nuestra. La vista inferior es una imagen reconstruida a través de los datos adquiridos por el Satélite COBE (NASA), en el infrarrojo próximo, desde una perspectiva complementaria a la superior. El diámetro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