

Grandes equivocaciones

Hasta los grandes científicos y pensadores se pueden equivocar cuando, al estar convencidos de sus ideas y verdades, no tienen lugar para aceptar nuevas propuestas. Por ejemplo, William Thomson, Lord Kelvin (1824 - 1907), famoso físico y matemático británico, declaraba que la radio no tenía futuro, que los rayos X resultarían una farsa y que las máquinas voladoras más pesadas que el aire eran imposibles.



Comunicación

La comunicación entre el piloto venezolano Ernesto Viso y su equipo técnico durante la carrera contribuyó para que el vehículo llegara en la cuarta posición en la categoría IndyCar del 6 de abril de 2008.



Página 6.



La física de las comunicaciones



Internet se está convirtiendo en la plaza del pueblo de la villa global del mañana.

Bill Gates
(EEUU, 1955)

Página 4.

El trueno

Es el ruido que se genera cuando se produce un rayo, y es un fenómeno de la naturaleza que siempre ha suscitado inquietud y temor.

Página 7.



Fisicasas

Las redes

Isbelia Martín (Universidad Simón Bolívar, Caracas)
Claudio Mendoza (IVIC/CeCalCULA)

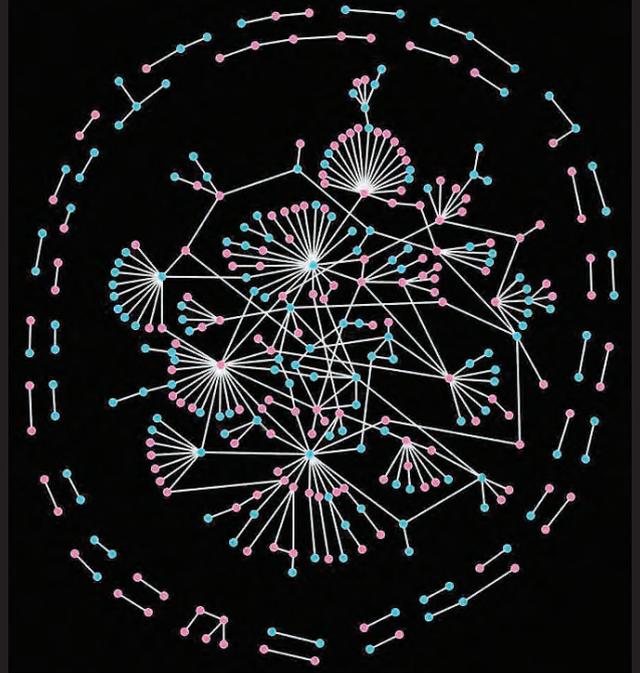
Subyacente a las comunicaciones está el importante concepto de redes. Por ejemplo, nos comunicamos a diario con una red familiar (padres, cónyuge, hijos, primos), de amigos, o en su forma más sofisticada, la Internet, con una red de redes internacional. También hemos oído hablar de redes tan disímiles como las redes de proteínas, las neuronales, redes sociales, bancarias, viales y redes de rutas aéreas.

En su esquema más simple, una red es una serie de nodos interconectados por enlaces que representan alguna relación entre ellos; puede estar conectada a otra red o contener a su vez subredes.

A pesar de la gran variedad de redes, un análisis detallado de cómo se organizan los nodos con diversos grados de conexión a otros nodos, muestra que tienen muchas propiedades en común, obedeciendo leyes o relaciones sencillas que permiten, por ejemplo, predecir las probabilidades de encontrar nodos con grados de conectividad determinados, predecir la forma de crecimiento de la red o determinar el número de enlaces promedio entre nodos.

A los físicos les interesa, en particular, estudiar la estructura de las redes y cómo cambia en el tiempo, la integridad de ellas ante la desaparición de algunos nodos o enlaces, de qué modo se originan subredes y cómo esta dinámica afecta la eficiencia de la funcionalidad de la red como un todo.

Las aplicaciones a la biología, a la medicina, sociología y a la tecnología son numerosas. Se ha probado que dos personas cualesquiera en la Tierra que no se conocen pueden comunicarse con un mensaje de correo electrónico que haya pasado a través de sólo cinco a siete personas amigas intermedias en promedio. Estos datos son aplicables, por ejemplo, al estudio de la propagación de enfermedades de transmisión sexual.



Estudiando redes de interacciones entre proteínas en células de la levadura se ha determinado la función de ciertas proteínas misteriosas

Fuente: www.cmth.bnl.gov/~maslov/networks.htm

¡¡¡¡¡ INTÉNTALO EN CASA

Presentando: **Marvin y Milo**

Qué necesitas: •Un vaso plástico o envase de yogurt
•Un trapo húmedo •Una cuerda lisa

¡Epa Milo, vamos a imitar a los pollos!

Para mi parte, perfora el fondo del vaso plástico. Pídele a un adulto que te ayude.

Corta un trozo de cuerda, pásalo por el hueco, y hazle un nudo en la parte de adentro del vaso para que no se salga.

Agarra la cuerda con el trapo húmedo. Frótala firmemente con el trapo hasta que el vaso cacaree.

Al frotar la cuerda con el trapo, vibra con un sonido tenue. Pero el vaso y el aire a su alrededor también vibran, amplificando el sonido lo suficiente para que lo oigamos.

Vic Le Billon - www.billybonbon.com

www.physics.org

Prueba y verás Sopla, sopla y verás



Parque Tecnológico de Mérida

Toma dos tiras de papel iguales, de 5 cm x 27 cm, sostén cada una en cada extremo de los labios, de manera que estén una frente a la otra. Sopla, sopla continuamente para tratar de separar las tiras, y ¡te sorprenderás de que se unan! De igual manera, si sostienes una hoja de papel de cuaderno justo debajo de los labios y soplas sostenidamente sobre la parte superior, te asombrará que el papel se levante.

Si eres más osado, perfora un vaso plástico con un agujero de 6 mm de diámetro. Coloca el vaso sobre un pedacito de papel y sopla continuamente dentro de él. Mientras sigas soplando podrás levantar el papel con el vaso, como si estuviera pegado. Todo ello ocurre porque el aire en movimiento ejerce menos presión que el aire estático, y esta diferencia de presión crea una fuerza de empuje conocida como el **efecto de Bernoulli**, el cual, en los casos anteriores, une o levanta los papeles. Este efecto se aplica en las alas de un avión, diseñadas de tal manera que el aire que pasa por encima fluye con mayor velocidad que el aire que pasa por debajo, generando una diferencia de presión que levanta al avión.



La física en la historia El reactor nuclear de Pipe

Yajaira Freitas, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Caracas

El reactor venezolano No.1 (RV-1) es el único reactor nuclear que ha tenido el país hasta el presente. Está ubicado en el Centro de Física del Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas –IVIC– en los Altos de Pipe, una zona montañosa en el kilómetro 11 de la Carretera Panamericana en vía hacia Los Teques, capital del Estado Miranda.

El RV-1 fue adquirido en 1955 por el gobierno del entonces general Marcos Pérez Jiménez (1952-1958). Para ello, el Dr. Humberto Fernández Morán (1924-1999) –ilustración–, quien había fundado el Instituto Venezolano de Neurología e Investigaciones Cerebrales en los Altos de Pipe, firma un convenio entre Venezuela y Estados Unidos bajo la iniciativa del programa “Átomos para la paz”. Estados Unidos donó 300 000 dólares para la construcción de dicho reactor y el resto fue completado por el gobierno venezolano. El costo total fue de un millón de dólares.

El RV-1 fue diseñado y construido por la General Nuclear Engineering Corp., y es de tipo piscina con una potencia de 3 a 5 megavatios. Usa combustible de uranio enriquecido al 20%, con un flujo de neutrones térmicos de $2,2 \times 10^{13}$ y un flujo de neutrones rápidos de 6×10^{13} . Llegó a su nivel crítico o de equilibrio el 12 de julio de 1960, bajo la supervisión de Fidel Alsina Fuertes (1912-1999?), físico argentino contratado por el IVIC.

En 2003, el reactor se convirtió en una planta de irradiación de rayos gamma (Pegamma), la cual permite esterilizar productos médicos, quirúrgicos, farmacéuticos y alimenticios, entre otros.



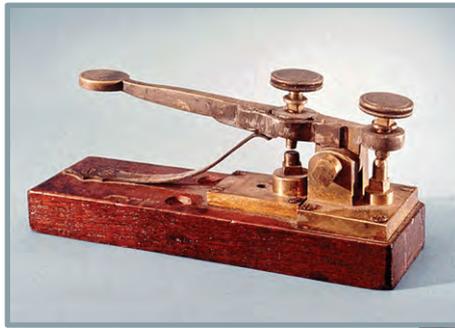
La física de las comunicaciones

Ermanno Pietrosemoli, Universidad de Los Andes, Mérida

El gran salto en la eficiencia de las comunicaciones ocurrió gracias a los avances de la física, en especial de los conocimientos sobre electricidad. Aunque la electricidad y el magnetismo eran conocidos desde la antigüedad, no fue sino hasta el siglo XVIII cuando se empezaron a analizar los fenómenos eléctricos gracias a los trabajos de los italianos Galvani y Volta. El físico danés Oersted por casualidad descubrió que el paso de una corriente eléctrica desviaba la aguja de una brújula, demostrando así la interrelación entre los fenómenos eléctricos y magnéticos. Esto dio pie al desarrollo del **telégrafo**, el primer medio de telecomunicación moderno, que tuvo un enorme impacto en todas las esferas de la actividad humana. La rapidez con la que se difundieron las redes telegráficas en el siglo XIX no ha tenido parangón hasta la aparición de Internet en el siglo XX.

Los primeros intentos de cruzar el Atlántico con cables submarinos fueron un rotundo fracaso, hasta que el físico británico Lord Kelvin analizó matemáticamente la propagación de la onda eléctrica en un cable de gran longitud, y especificó los requerimientos para que la transmisión fuera exitosa. En 1867 Maxwell, otro gran físico británico, logró sintetizar todos los fenómenos eléctricos y magnéticos conocidos en su época en sólo cuatro ecuaciones, a partir de las cuales se pueden derivar todas las fórmulas de electricidad y magnetismo. Al realizar esta portentosa síntesis, predijo la existencia de ondas electromagnéticas de las cuales la luz visible era un caso particular. Todas las ondas electromagnéticas se propagarían a la velocidad de la luz y, a diferencia de las ondas hasta entonces conocidas, no requerían de ningún soporte físico pudiendo propagarse en el aire y aún en el vacío, en este último caso a 300 000 km/s. Veinte años más tarde, el físico alemán Hertz demostró, por primera vez, la propagación de las ondas de radio, corroborando las predicciones de Maxwell.

Guglielmo Marconi, un joven físico italiano de veinte años, empezó a experimentar con mecanismos para aumentar el alcance de las transmisiones de radio. En 1895 logró transmitir a 3 km. Posteriormente se mudó a Inglaterra y logró transmitir a distancias cada vez mayores. Sus intentos por hacerlo entre Inglaterra y Norteamérica le granjearon la conmiseración de los físicos teóricos, quienes acertadamente hacían



Satélite de comunicación

notar que las ondas de radio serían bloqueadas por la curvatura terrestre en un trayecto de esa distancia. Sin embargo, Marconi continuó tozudamente en su empeño y, en 1901, logró demostrar la transmisión intercontinental. La explicación de esta incongruencia es la existencia de una capa ionizada en la alta atmósfera que refleja las ondas de radio permitiendo alcances más allá de la línea de vista. La necesidad de la transmisión inalámbrica fue demostrada durante el naufragio del Titanic en 1912, a partir del cual todos los grandes barcos fueron dotados de aparatos de radio para comunicaciones de emergencia. La movilidad es la gran ventaja que ofrece la radio respecto a las comunicaciones que requieren de un cable.

La transmisión de voz directamente por ondas electromagnéticas fue el resultado del trabajo de numerosos investigadores entre los que destacan Elisha Gray, Antonio Meucci y el escocés Alexander Bell, siendo este último el único que cosechó los beneficios económicos del invento del teléfono gracias a su mejor conocimiento del sistema de patentes. Apenas cinco años después de la instalación de la primera empresa telefónica del mundo en Estados Unidos, se instaló una en Caracas en 1883.

Los esfuerzos para mejorar los sistemas de comunicaciones estaban limitados por la dificultad de establecer un modelo matemático que describiera algo tan intangible como la transmisión de información.



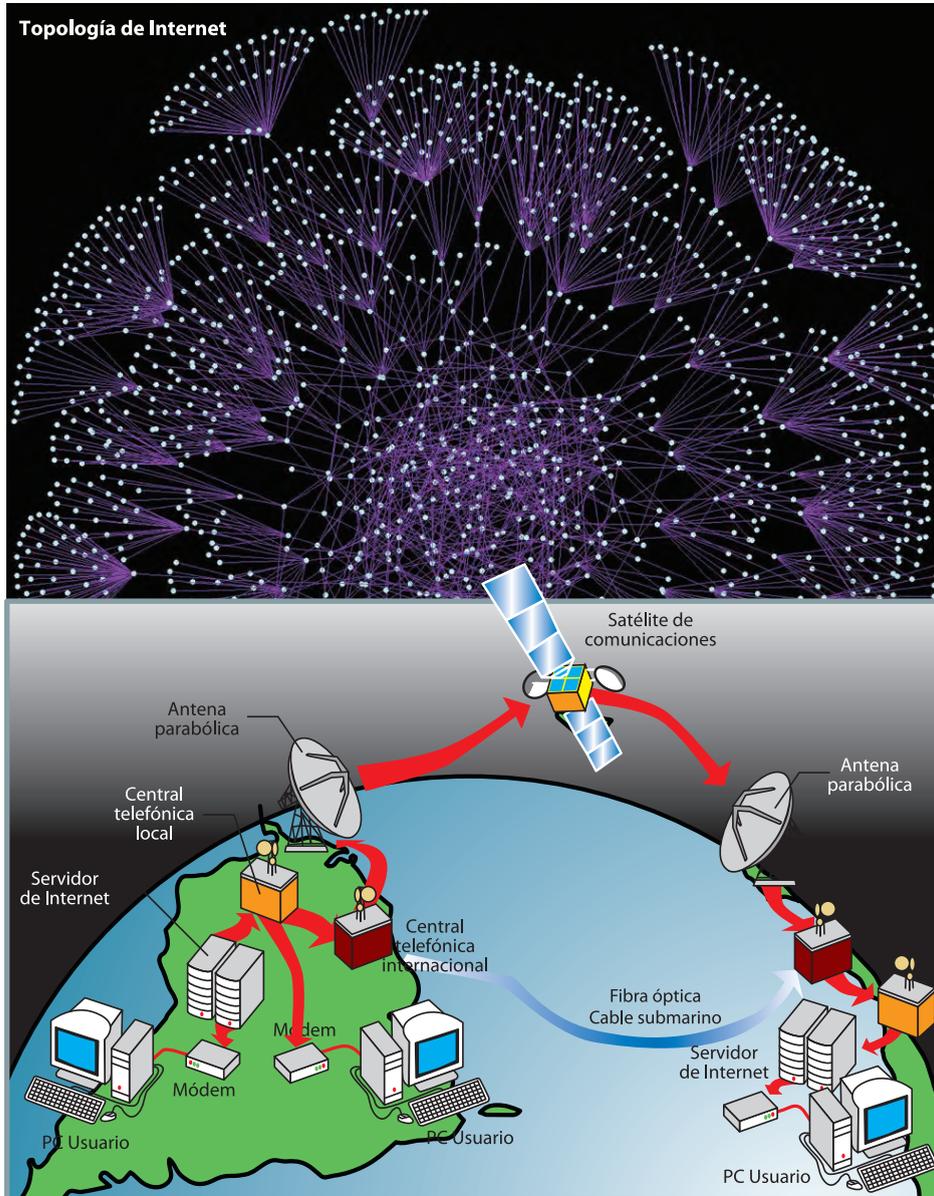
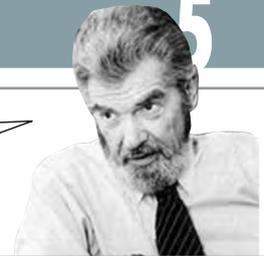
nes

La Internet es mucho más ahora que los resultados deportivos y el correo electrónico. Es el lugar donde podemos conducir nuestra democracia, y hacerle llegar grandes cantidades de datos a muchas personas.

Frank James (Chicago Tribune)

La ventaja de los medios modernos de comunicación es que te permiten preocuparte por las cosas en todo el mundo.

Laurence J. Peter (Canadá, 1919 - 1990)



La comunicación entre máquinas plantea un nuevo desafío, ya que hay que establecer una serie de reglas muy minuciosas que consideren todas las posibles eventualidades que pueden ocurrir durante la transferencia de información. Este conjunto de reglas se denomina Protocolo de Comunicación. Existe una infinidad de protocolos de comunicación, cada uno adaptado a necesidades específicas, pero el grupo de protocolos conocidos como **TCP/IP** sentó las bases para el establecimiento de la **Internet**, la red mundial que interconecta millones de computadoras en todo el mundo. Tim Berners-Lee, un físico que trabajaba en el laboratorio CERN de altas energías en Suiza, inventó en 1991 un protocolo, el **World Wide Web**, que hizo a la Internet accesible a usuarios sin conocimientos técnicos, permitiéndoles acceder fácilmente a cualquier tipo de información contenida en la inmensa red de redes. Los teléfonos celulares modernos contienen también computadoras muy sofisticadas que les permiten ser verdaderos centros de comunicación mediante su conexión a la Internet. La Internet es hoy en día indispensable en los campos de la educación, la salud, el entretenimiento y la productividad, y ha impactado fuertemente las organizaciones políticas y de otra índole, a través de mecanismos como el del gobierno electrónico, la banca electrónica, etc.

Uno de los aspectos más preocupantes hoy en día es el de la seguridad de las redes de comunicaciones. Nuestra dependencia de Internet nos hace más vulnerables a los ataques de personas y organizaciones inescrupulosas que pueden intervenir nuestras comunicaciones, cambiar su contenido o simplemente impedir nuestro acceso a las mismas. La física cuántica ofrece un mecanismo para garantizar la privacidad de las comunicaciones a través del concepto del "enredo" de las partículas elementales. Éste permite verificar la integridad de un mensaje independientemente de la distancia de la que proviene, obviando además la necesidad de compartir una clave entre el transmisor y el receptor. Esta última es la limitación principal de los sistemas de protección de información tradicionales. Una vez más, ¡la física al rescate!

Este dilema fue abordado por Claude Shannon quien en 1948 propuso definir la información en términos más restrictivos despojándola del contenido semántico, introduciendo una definición de información con base en el grado de incertidumbre en el receptor respecto a lo que se está transmitiendo. Este modelo permite expresar cualquier mensaje, sea un texto escrito, un trozo musical, una fotografía o una imagen en movimiento, como una serie de símbolos elementales que sólo tienen dos valores posibles, 1 o 0, denominados **bits**, que determinan unívocamente los requerimientos del sistema para la transmisión o el almacenamiento de cualquier mensaje.

La revolución digital no hubiera sido posible sin los trabajos de un trío de físicos, Shockley, Brattain y Bardeen, que en el mismo año y en el mismo laboratorio donde trabajaba Shannon, sentaron la base de la electrónica moderna al demostrar el funcionamiento del primer **transistor**. El transistor y su descendiente directo, el **circuito integrado**, permitieron el desarrollo de las computadoras electrónicas y de la miríada de dispositivos digitales que nos rodean. Pronto se hizo evidente que la utilidad de las computadoras trasciende al mero cálculo, y que su desempeño se incrementa notablemente cuando se les dota de la posibilidad de comunicarse entre sí.



RETO
¿Por qué se mide en nudos la velocidad de los barcos?

Solución: <http://www.fundacionempresaspolars.org>

La física en... los satélites de comunicación

Satélite y antena siempre alineados

Parque Tecnológico de Mérida

¿No te has preguntado cómo una antena parabólica que está fija sobre un techo puede recibir decenas de canales de televisión de un satélite? Así como la Tierra gira sobre su eje una vez al día, también gira la antena. ¿Cómo es que estando fija respecto a la Tierra recibe permanentemente la información del satélite?

La respuesta está en que los satélites de comunicación dan vueltas alrededor de la Tierra en órbitas llamadas **geoestacionarias**. Estos satélites son puestos en una órbita especial de manera que giran alrededor de la Tierra con la misma velocidad angular (y en el mismo sentido) que **un punto en el Ecuador**. De esta manera ese satélite siempre está sobre el mismo punto del Ecuador terrestre y, por esa razón, nuestra antena parabólica siempre está alineada con el satélite. Así mismo la estación terrestre (que transmite la señal) siempre está apuntando al satélite que retransmite la señal de vuelta a la superficie terrestre.

Esta órbita geoestacionaria se encuentra a 35 786 kilómetros de altura sobre el plano ecuatorial (latitud 0°), y colocándolos en diferentes longitudes tenemos satélites para distintos lugares de la Tierra.



Deportes

Comunicaciones en los deportes

Rogelio F. Chovet

El entrenador (*coach*) de un equipo de fútbol americano puede comunicarse con el mariscal de campo (*quarterback*) para darle las instrucciones necesarias hasta que el segundo reloj de 40 segundos le falten 15.

Por otro lado, el año 1954 fue especial para la Organización NASCAR (Asociación Nacional de Carreras de Autos de Serie) ya que por primera vez se logró la cobertura televisiva a través de un programa llamado "Wire Wheels". Así mismo fue el primer año en que un piloto tuvo comunicación de doble vía con su equipo durante una carrera que sigue formando parte del equipamiento de estos vehículos de carrera.

En el caso del fútbol americano, la comunicación se basa en redes de acoplamiento (MESH) originalmente desarrolladas para aplicaciones militares. Estas redes proporcionan comunicaciones encriptadas (cifradas) de muy alto rendimiento y que pueden crecer. Es importante destacar que estos equipos de comunicación deben ser certificados por la Liga Nacional de Fútbol Americano (NFL) ya que los mismos deben bloquear la conversación durante el lapso de juego en que ésta no se debe efectuar.

Todas las radios funcionan según **bandas de frecuencias** que generalmente denominamos: onda media, onda corta, FM (VHF), etc. Estas bandas son divisiones del espectro radioeléctrico que por convención se han hecho para distribuir los distintos servicios de telecomunicaciones.

Según el Sistema Internacional, la **frecuencia** se mide en hertz (Hz), en honor a Heinrich Rudolf Hertz (Alemania, 1857-1894). Un hertz es aquel suceso o fenómeno repetido una vez por segundo,

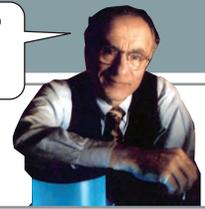
$$1\text{Hz} = 1 \text{ ocurrencia}/1 \text{ segundo.}$$

La frecuencia tiene una relación inversa con el concepto de **longitud de onda**, la distancia entre dos crestas consecutivas: a mayor frecuencia menor longitud de onda y viceversa. La frecuencia f es igual a la velocidad v de la onda dividida por la longitud de onda λ .



El piloto venezolano Ernesto Viso (vehículo N° 33 en la foto) alcanzó, el día 6 de abril 2008, el cuarto lugar en el Gran Premio de San Petersburgo (Florida, EEUU) y correspondiente al circuito de la categoría IndyCar, donde también utilizan estos sistemas de comunicación.

La existencia de la radiación de fondo estableció la validez del modelo del Universo en expansión.



Arno Penzias (Alemania, 1933)

Retos del siglo XXI

Origen y evolución del Universo

Claudio Mendoza, IVIC/CeCalCULA

Uno de los grandes logros del siglo XX ha sido el modelo sobre el origen y evolución de nuestro Universo, cuyo estudio seguirá dominando la cosmología en las próximas décadas. Se basa en la teoría del **Big Bang**, la cual enuncia que el Universo comenzó hace aproximadamente 14 billardos de años con una gran explosión cósmica que lanzó materia en todas las direcciones. Describe la subsiguiente expansión, el origen primordial de los elementos livianos (hidrógeno, helio y el litio), el eco de la explosión en la forma de una radiación de fondo y la formación de estructuras a gran escala.

El origen del modelo se remonta, a comienzos de los años 1920, a las demostraciones matemáticas de los cosmólogos Alexan-

der Friedmann (Rusia), Georges Lemaître (Bélgica), Howard P. Robertson (EEUU) y Arthur G. Walker (Inglaterra) sobre el carácter dinámico del Universo, regulado por la fuerza de gravedad de la **teoría general de la relatividad** de Einstein. Recibe un decisivo apoyo en 1929 con las observaciones astronómicas de Edwin Hubble sobre las galaxias en movimiento recesivo. En 1964, el **Big Bang** queda finalmente establecido con el descubrimiento de la **radiación de fondo cósmica**, el eco de la explosión inicial, por Arno Penzias y Robert Wilson de los Laboratorios Bell de Estados Unidos.

Sin embargo, observaciones recientes sobre la radiación de fondo llevadas a cabo por las sondas espaciales COBE y WMAP han dado a relucir evidencias sobre la expansión del **Big Bang** que tienen a los físicos rascándose la cabeza. Por ejemplo, al comienzo de la explosión, la expansión fue descomunal, algo así como un instante de "inflación", cuyo origen y características no han sido precisados del todo. Más aún, el inventario de materia que el Universo debería tener es mucho mayor del que observamos y, en contra de nuestra intuición, la expansión en la actualidad tiende a acelerarse. Explicar estas observaciones, y compaginarlas con las propiedades fundamentales de la materia determinadas con los nuevos aceleradores, estarán entre los grandes retos del presente siglo.

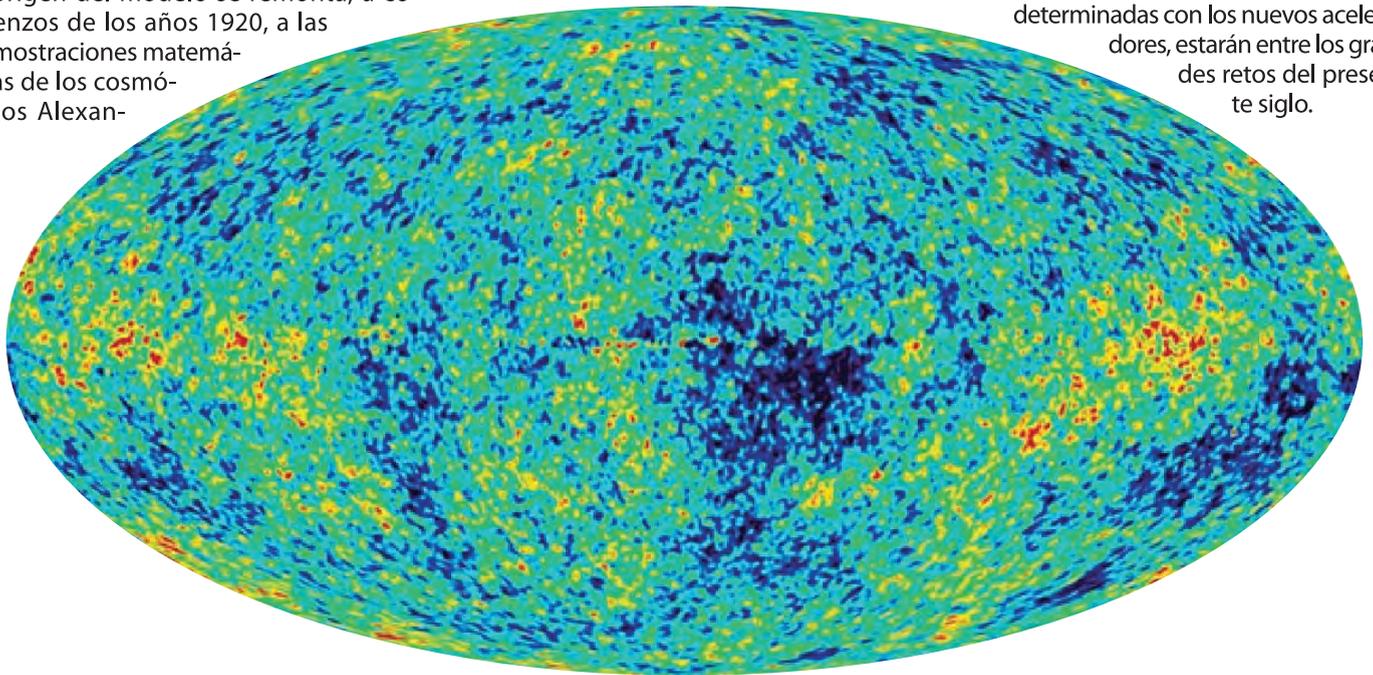
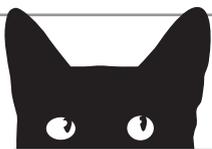


Imagen de las fluctuaciones de la radiación de fondo cósmica observada en 2003 por la sonda espacial WMAP. De ella se puede estimar que la edad del Universo es de alrededor de 13,7 billardos de años, que la geometría universal es plana, que la cantidad de materia radiante es mínima y que la expansión se está acelerando.



Curiosidades

El trueno

Ángel Delgado, Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Caracas

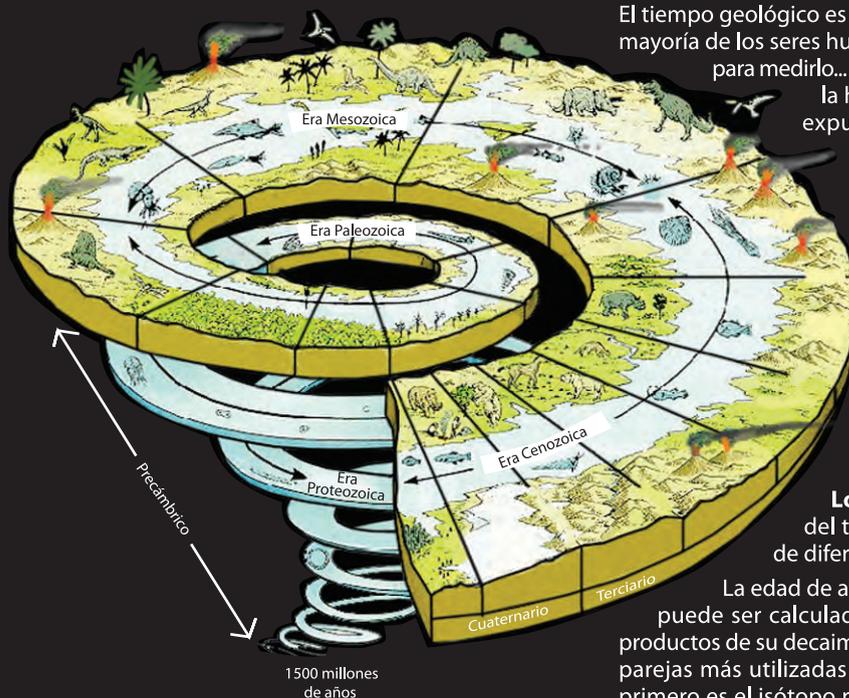
El trueno, ruido que se genera cuando se produce un rayo, es un fenómeno de la naturaleza que siempre ha suscitado inquietud y temor. Su explicación no es sencilla por cuanto depende de varios factores al mismo tiempo. Aún así, se manejan algunas explicaciones para este fenómeno, la más clara y entendible es la que mantiene que la causa del trueno es la necesidad del aire de expandirse rápidamente como consecuencia del violento calentamiento por el relámpago, y su posterior contracción en un intervalo de tiempo muy corto.

La enorme energía del rayo calienta un estrecho canal de aire a más de 50 000 °C. Esto se hace tan rápidamente (se calcula que en unas pocas millonésimas de segundo para cada sección de la descarga) que el canal de aire caliente no tiene tiempo de expandirse adecuadamente mientras se calienta, produciéndose una gran presión en el canal la cual puede ser mayor de 100 atmósferas. La presión luego genera una perturbación sonora que percibimos como un trueno.



Planeta Tierra: el tiempo geológico

Inírida Rodríguez, Universidad Central de Venezuela, Caracas



El tiempo geológico es un concepto extremadamente difícil de comprender para la mayoría de los seres humanos, al igual que los métodos aplicados por los geólogos para medirlo... Un verdadero trabajo detectivesco que nos permite reconstruir

la historia de la Tierra a partir del estudio de las rocas, tanto las expuestas en superficie como las alcanzadas en profundidad mediante perforaciones. Así, las rocas ígneas antiguas y las rocas metamórficas nos dan pistas sobre el origen y evolución temprana de la Tierra. Las rocas sometidas a procesos de deformación nos ayudan a comprender la formación de las cadenas de montañas y desarrollo de cuencas, y las rocas sedimentarias con sus fósiles nos proporcionan evidencias para reconstruir los eventos ocurridos en la superficie terrestre durante los últimos miles de millones de años.

Sabiendo que en una columna sedimentaria no alterada, las rocas más antiguas se encuentran en la base, el geólogo puede descubrir la secuencia de eventos ocurridos.

Los Fósiles, ¿qué nos dicen estas criaturas desde los confines del tiempo? Nos ayudan a correlacionar las secuencias de rocas de diferentes áreas y determinar la edad relativa de esas rocas.

La edad de algunos tipos de rocas, y de los eventos que las han afectado, puede ser calculada a partir de la cantidad de elementos radioactivos y los productos de su decaimiento presentes en los minerales contenidos en las rocas. Las parejas más utilizadas son **uranio-torio**, **potasio-argón** y **rubidio-estroncio**. El primero es el isótopo radioactivo y el segundo el isótopo estable. Este método es particularmente útil para conocer la edad de las rocas que no contienen fósiles.

En Venezuela, en el Escudo de Guayana al Sur del Río Orinoco, encontramos rocas ígneas e ígneometamórficas cuyas edades, del orden de 3 000 millones de años, se cuentan entre las más antiguas de la Tierra.



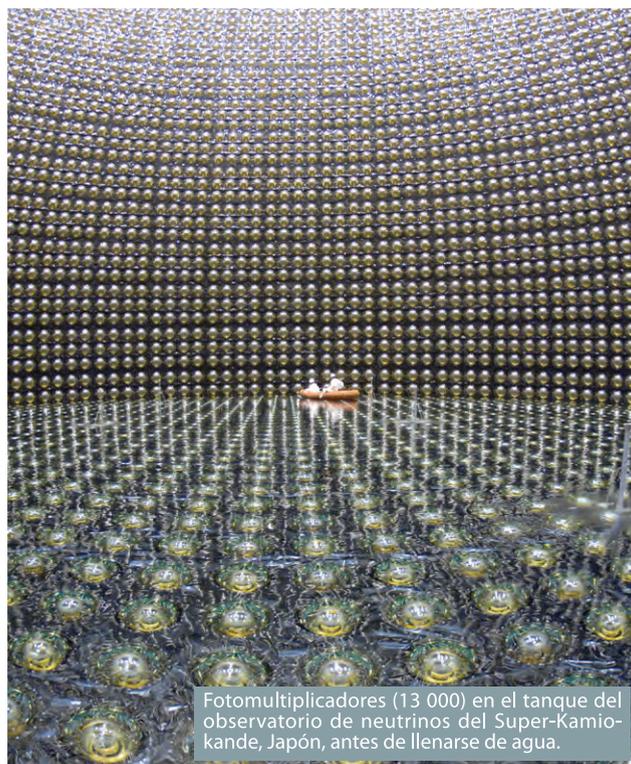
Las siete maravillas de la física Detectores de neutrinos

Claudio Mendoza, IVIC/CeCalCULA

Los neutrinos son partículas muy poco masivas, a lo sumo 200 000 veces más livianas que el electrón, no tienen carga eléctrica y su interacción con la materia es realmente débil. Se produjeron por primera vez al comienzo del Universo justo después de la explosión del *Big Bang*. Hoy en día, son productos de las reacciones nucleares en el interior de las estrellas, en eventos astronómicos explosivos como las supernovas, en las lluvias de rayos cósmicos en la atmósfera terrestre y, en nuestro entorno, en aceleradores y reactores nucleares. Debido a su débil interacción con la materia, los neutrinos nos traen información prístina, sin contaminación de todo el Universo que, por supuesto, queremos estudiar.

Para ello se han construido unos gigantes tanques de agua bajo tierra cuyas paredes internas están completamente forradas de detectores (tubos fotomultiplicadores de Cherenkov) para atrapar la escasa luz que emite la materia al chocar con un afortunado neutrino. En el caso del observatorio del Super-Kamiokande en Japón, el tanque se construyó en una mina abandonada a 2 700 m bajo tierra, tiene 40 m de diámetro, 40 m de altura, 50 000 toneladas de agua y 13 000 fotomultiplicadores.

Uno de los problemas más importantes que se han resuelto con estos observatorios se relaciona con el flujo de neutrinos que viene desde el interior del Sol, que es mucho menor (un tercio) del que proponen los modelos teóricos, y por el cual Raymond Davis y Masatoshi Koshiba recibieron el Premio Nobel de Física en 2002. La explicación de esa diferencia fue finalmente comprobada ese mismo año con las observaciones del Observatorio de Neutrinos de Sudbury, Canadá.



Fotomultiplicadores (13 000) en el tanque del observatorio de neutrinos del Super-Kamiokande, Japón, antes de llenarse de agua.