

# LA GEOMETRIA DEL UNIVERSO Y LA RADIACION COSMICA DE FONDO\*

Héctor Rago

Grupo de Física Teórica y Centro de Astrofísica Teórica,  
Universidad de Los Andes. email: rago@ciens.ula.ve

Recibido: 26/09/00 ; Revisado: 10/10/00 ; Aceptado: 17/10/00

**RESUMEN:** La Radiación Cómica de Microondas que llena uniformemente el espacio, es un vestigio de una época cuando el universo era unas mil veces más pequeño y más caliente. Recientemente los cosmólogos han aprendido a descifrar en las tenues anisotropías del patrón de temperaturas de la radiación, características físicas del universo temprano. Las evidencias acumuladas en los dos últimos años sugieren con vigor que la geometría del espacio a escala cosmológica es euclidiana. En este ensayo explicamos de una manera no técnica, los alcances y las consecuencias de uno de los más impactantes resultados de la cosmología contemporánea. **Palabras clave:** Relatividad, cosmología, radiación de fondo,

## THE GEOMETRY OF THE UNIVERSE AND THE MICROWAVE COSMIC RADIATION

**ABSTRACT:** The Microwave Cosmic Radiation which fills uniformly the space, is a remnant of the (epoch) when the universe was about a thousand times smaller and hotter. Recently, cosmologists have learned to discover, in the subtle anisotropies of the radiation temperature pattern, physical properties of the early universe. The observational results obtained in the last two years, strongly suggest that, at a cosmological scale, the geometry of the space is euclidean. In this essay we provide a non-technical explanation of the consequences of one of the most thought-provoking results of contemporary cosmology. **Key Words:** Relativity, cosmology, background radiation.

### PREGUNTAS PARA COMENZAR

En el esfuerzo ineludible de dilucidar su relación con el mundo, y no morir en el intento, la humanidad no ha dejado de hacerse preguntas. Una selección no tan al azar es la siguiente:

- ¿Tuvo un origen el universo, o es eterno?
- ¿Cuál es su destino? ¿Se seguirá expandiendo o comenzará eventualmente a contraerse?
- ¿Qué contiene el universo? ¿De qué está formado?
- ¿De dónde surgieron las galaxias, las estrellas y los planetas?
- ¿Cómo y por qué cae una manzana? ¿Qué es la gravitación?
- ¿Cuál es la geometría del universo?

Recientemente los cosmólogos han venido acumulando evidencias que nos permiten responder de manera cada vez más convincente la última de estas preguntas: ¿cuál es la geometría del universo? A riesgo de eliminar el suspenso del relato, responderemos desde ya que la geometría del universo es la vieja y noble geometría euclidiana de nuestros desvelos en bachillerato. Saber qué significa que la geometría válida para el universo sea euclidiana, conocer qué otras opciones hay, vislumbrar de qué manera podemos llegar a esa conclusión, qué consecuencias tiene y urdir algunas especulaciones acerca de por qué es

así y cuáles son las limitaciones, nos paseará por las otras preguntas y sus posibles respuestas.

La cosmología vive momentos de gloria y se están haciendo descubrimientos importantes gracias a la coincidencia de una tecnología observacional poderosa y a la comprensión cada vez mayor de las leyes de la física local. A lo largo y ancho de este trabajo intentaremos destacar que el tema es relevante, no sólo porque se está respondiendo una de las preguntas importantes que desde hace mucho se hizo la cosmología, sino porque toca muchos otros temas, como la indisoluble relación entre la física y las matemáticas, la historia de la geometría, y las preguntas que formulamos anteriormente.

### AVENTURAS Y DESVENTURAS EN LA SUPERFICIE DE LA TIERRA

Antes de abordar con decisión la pregunta de cuál es la geometría del universo, conviene demorarnos en otra pregunta: ¿es la superficie de la Tierra plana o esférica? Alguna vez en la historia esta pregunta no estuvo respondida y aprendimos a encontrar una respuesta definitiva. Por tratarse de un problema más sencillo lo usaremos como una estrategia para sacar algunas enseñanzas útiles para lo que nos interesa. Desde ya señalemos que así en la Tierra como en el universo, conviene distinguir claramente entre las preguntas ¿cuál es la geometría? ¿cómo sabemos que es esa y no otra? y finalmente ¿por qué es esa?

Es claro que sobre la superficie de la tierra nos podemos mover sólo en dos direcciones independientes. También es claro que para localizar un objeto en la superficie de la Tierra solamente son necesarios dos números, por

\* Basado en una Conferencia Invitada en las IV Jornadas de Astronomía, Planetario Humboldt, Caracas, 26-27 de agosto de 2000.

ejemplo, latitud y longitud. Estas son maneras de decir que la superficie terrestre tiene dos dimensiones. Por otra parte, hablar de una geometría sencilla para la superficie de la Tierra, equivale a suponer que los edificios, valles y montañas son pequeñas irregularidades, despreciables respecto de la escala que nos interesa. Los 10 Km del Everest son apenas el 0,15% del radio terrestre: la Tierra es una esfera con un 99,85% de uniformidad. Una vez hecha esa aproximación, supondremos como se ha hecho históricamente, que las propiedades son más o menos las mismas en cualquier lugar de la superficie (y no como un jarrón, muy curvado en algunos sitios y menos curvado en otros) y por tanto, que la geometría es uniforme (luego emplearemos un término más técnico). Después de todo esto nos topamos con otro problema; y es que a pequeña escala toda superficie curva parece plana, o con algo más de precisión, toda geometría es localmente euclidiana. Debemos por tanto hilar más fino. El método obvio para conocer la forma de la superficie de la Tierra es abandonar las dos dimensiones de la superficie, salir al espacio exterior desde donde a suficiente altura veremos al planeta exhibiendo su redondez y no su planitud. Para los griegos esto era irrealizable, de modo que idearon el siguiente método. Advirtieron que las sombras que dejan al sol dos objetos iguales, en ciudades separadas y a la misma hora, tienen extensiones diferentes. Una varilla vertical de un metro de alto, deja una sombra de 15 cm. de largo en Porlamar cuando en Maracaibo no deja sombra Eratóstenes atribuyó correctamente la diferencia, a la curvatura de la superficie, y con ingenio y algo de matemáticas elementales calculó el radio que debía tener la Tierra, obteniendo un valor muy cercano al que hoy conocemos. El método griego es esencialmente similar al que permite concluir que la superficie de la Tierra es curva porque constatamos un horizonte. En efecto, si la Tierra fuese plana, pudiéramos ver objetos a distancias arbitrariamente lejanas. Con la altura del observador y la distancia al horizonte, se puede calcular el radio de la Tierra. Estos métodos pueden ser criticados porque suponen que abandonamos la superficie que queremos conocer. Una manera libre de este pecado es el que pudiéramos llamar el método de Magallanes; es decir, viajar en una dirección y corroborar que regresamos al lugar de partida. Idealmente se trata de viajar en línea "recta", o siguiendo siempre la trayectoria más corta, que llamaremos en lo sucesivo, geodésicas. Sutileza: para concluir que la superficie es cerrada, no basta con recorrer una geodésica y ver que se regresa al punto de partida. Hay que hacerlo en las dos direcciones perpendiculares, porque podría tratarse de la superficie de un cilindro, por ejemplo, cerrada en una dirección pero abierta o infinita en la otra.

#### GEODESICAS Y GEOMETRIA INTRINSECA

La información acerca de las propiedades geométricas de una superficie está codificada en el comportamiento de sus curvas más cortas, es decir, en el comportamiento de

sus geodésicas. Sobre un plano las geodésicas son líneas rectas, la distancia que separa a dos rectas es constante si las rectas son paralelas o va cambiando proporcionalmente a la distancia, es decir, sin "aceleración", en caso de que no lo sean. Si unimos tres puntos del plano con rectas, la suma de los ángulos internos del triángulo obtenido será de  $180^\circ$ . Si con una cuerda trazamos una circunferencia, la relación del perímetro al radio será  $2\pi$ . Estas propiedades definen a la geometría euclidiana de nuestros tormentos, y decimos que la curvatura del plano euclidiano es igual a cero.

En cambio, si estuviéramos sobre una superficie esférica, las geodésicas serían arcos máximos, la distancia que separa a dos geodésicas, se "desacelera", y por tanto si inicialmente las curvas eran paralelas, convergerán y se cruzarán. Si trazamos un triángulo geodésico, podremos verificar que la suma de los ángulos internos es mayor de  $180^\circ$ , y que si trazamos un círculo, la relación entre el perímetro y el radio es menor a  $2\pi$ . La superficie esférica tiene curvatura positiva. Hay un tercer caso de superficies homogéneas, cuyas geodésicas son hipérbolas y por eso se llama geometría hiperbólica. En ella las geodésicas divergen, la suma de los ángulos internos de un triángulo es menor a  $180^\circ$ , la relación entre el perímetro y el radio de un círculo es mayor que  $2\pi$  y su curvatura es negativa. Esta geometría que podemos imaginarla como la superficie de una silla de montar caballos, jamás fue considerada para modelar la forma de la tierra, entre otras cosas porque fue inventada (¿o descubierta?) en el siglo XIX.

Lo importante es que la curvatura de una superficie puede evidenciarse de una manera intrínseca, haciendo mediciones de ángulos y distancias sin abandonar la superficie. Las propiedades intrínsecas no cambian al hacer una transformación que no signifique estiramiento o ruptura. Por ejemplo, puede constatarse fácilmente que la superficie de un cilindro tiene una geometría euclidiana.

#### LAS GEOMETRIAS DEL ESPACIO: DE DOS DIMENSIONES A TRES

Vislumbrar la geometría de una superficie (de dos dimensiones) es relativamente sencillo porque podemos visualizarla inmersa en nuestras tres dimensiones (ancho, largo y alto) de nuestro espacio. El problema surge cuando nos preguntamos acerca de la geometría del propio espacio, porque no podemos salir a una cuarta dimensión, ver al espacio desde afuera y saber si está curvado o no.

Durante milenios la geometría euclidiana tuvo la exclusividad de representar nuestro espacio. Esta exclusividad la catapultó a la categoría de verdad absoluta acerca de la naturaleza del mundo y no como un aspecto de las matemáticas capaz de representar un mundo posible. Que los humanos hubiésemos descubierto esa verdad absoluta, significaba que nuestro cerebro tenía impresos los conceptos euclidianos previamente. Esta era la posición de Kant, por ejemplo.

## BUENO ES EUCLIDES, PERO NO TANTO

Pero el desarrollo de las matemáticas a mediados del siglo XIX asestó un rudo golpe a las pretensiones hegemónicas de Euclides. Los trabajos de Karl Frederick Gauss, János Bolyai y Nikolai Lobachetvski demostraron que es perfectamente posible concebir sistemas geométricos coherentes, diferentes del sistema euclidiano. Por primera vez en la historia surgió la necesidad de invocar el experimento y la observación para establecer la geometría válida para nuestro espacio. Cuentan que Gauss utilizó teodolitos para medir los ángulos internos de un triángulo formado por las cúspides de tres montañas, para establecer qué geometría nos rige. Karl Schwarzschild siguiendo una sugerencia de William Clifford propuso un método basado en contar estrellas, con el mismo fin. Los resultados no condujeron a ninguna desviación de la geometría euclidiana, pero a lo mejor así como una región pequeña de una superficie curva luce como un plano, tal vez estuviésemos percibiendo un espacio euclidiano sólo porque no se estaba mirando a la escala adecuada.

## COMO ENTENDER LOS ESPACIOS CURVOS

Supongamos que las propiedades del espacio son las mismas en todos sus puntos, es decir, en cada punto todas las direcciones son equivalentes y cualquier punto del espacio es equivalente a otro (esta democracia se llama en términos técnicos máxima simetría), entonces los matemáticos nos aseguran que la curvatura del espacio es constante (es la misma en cualquier punto en que se le mida) y que hay solamente tres geometrías muy similares a sus contrapartes bidimensionales. Estas geometrías están caracterizadas por el signo de su curvatura, etiquetado por la letra  $k$ , y que puede tomar tres valores,  $k = 1, 0, -1$ . Si:

- $k = 0$ , la geometría es la euclidiana de nuestros pesares, con las propiedades que le conocemos. Es un espacio que se extiende infinitamente a lo largo de sus dimensiones, para círculos, triángulos y separación de geodésicas, valen los resultados que reseñamos para los planos euclidianos.
- $k = 1$ , la geometría se llama esférica. Su curvatura es positiva, y en cualquiera de las tres direcciones que tracemos geodésicas, retornaremos al punto de partida, es decir, el volumen que abarca el espacio esférico es finito. El comportamiento de círculos, triángulos, y separación de geodésicas, es similar al caso bidimensional.
- $k = -1$ , la geometría se llama (adivinen) hiperbólica, su curvatura es negativa, sus geodésicas no se cierran, el volumen que abarca es infinito, y por supuesto, el comportamiento de círculos, triángulos, y separación de geodésicas, es similar al caso bidimensional.

Queremos insistir en que la intuición no colabora demasiado en trance de figurarnos espacios tridimensionales curvos, pero las matemáticas nos enseñan que las propiedades intrínsecas de la geometría (como la curvatura) pueden obtenerse sin "salir" de nuestras tres dimensiones. Por ejemplo, imaginemos un objeto de tamaño conocido,  $S$ , que está situado a una gran distancia  $D$  del observador. Si la geometría es euclidiana, el ángulo  $\alpha$  que forma el objeto visto por el observador, es  $\alpha = S/D$ . Cualquier desviación de esta fórmula, es atribuible a la curvatura del espacio. Como veremos más adelante, en un resultado muy similar al de este ejemplo, se basan las recientes determinaciones de la geometría del universo.

Hacia 1860 el gran matemático alemán Bernard Riemann hizo dos importantes generalizaciones. Extendió la maquinaria geométrica a espacios con curvatura variable, es decir, que están curvados de manera no uniforme y además, en el más matemático de los espíritus, amplió el formalismo a espacios  $n$ -dimensionales.

## LA GRAVEDAD CURVA AL ESPACIO

Pero el golpe final a la geometría euclidiana y que habría de bajarla del pedestal de las verdades absolutas a la arena del mundo de los fenómenos físicos y a los avatares del universo y su evolución, se lo había de propinar Einstein en 1915 con su relatividad general.

Antes de la relatividad, el espacio era considerado un escenario (euclidiano) inmutable en el cual las partículas materiales y los campos físicos interactuaban de acuerdo a un guión establecido por las leyes fundamentales de la naturaleza. A partir de 1915 esta concepción fue superada definitivamente. El "escenario" pasó del rol pasivo al de actor. La geometría del espacio (y el tiempo) se transformó en otro campo físico sujeto a leyes de evolución como cualquier otro. La gravitación no es en la concepción de Einstein, una fuerza que "vive" en el espacio euclidiano. La gravitación es la curvatura del espacio (y el tiempo), debido a la presencia de materia y energía. En ausencia de materia o muy lejos de ella, el espacio es euclidiano, indicando la ausencia de gravitación; pero cerca de cuerpos gravitantes el espacio se curva como manifestación de la gravedad. La materia le indica al espacio cómo se va a curvar, y el espacio le indica a la materia cómo se va a mover en el espacio curvo. Una manzana "cae" siguiendo una geodésica del espaciotiempo curvado por la gravedad terrestre. Así respondemos la quinta pregunta de la introducción.

Las famosas ecuaciones de Einstein son la receta que controla cuantitativamente esta simbiosis entre la materia y su movimiento, y la geometría y sus curvaturas.

Gracias a la relatividad podemos "echarle la culpa" a la gravitación, de una presunta curvatura del espacio. En otras palabras, disponemos ahora de una prescripción para obtener la geometría en una región del espacio, en términos de las circunstancias físicas en esa región. Y recíprocamente, si determinamos la geometría, las ecuaciones

ciones de Einstein nos dicen la distribución de materia y energía que la crea.

La vinculación materia-geometría abre la posibilidad de explicarnos la razón por la cual la geometría de Euclides se impone como “verdadera”, “natural”, “obvia”, “intuitiva”. La razón es que si se calcula la geometría del espacio alrededor de la Tierra, las desviaciones respecto de la de Euclides son tan pequeñas que resultan indetectables. En otros términos, la geometría euclidiana nos luce “natural” porque durante milenios nuestro cerebro ha evolucionado en un ambiente donde la gravitación es tan débil que casi no curva al espacio. En la superficie de una estrella neutrónica, en cambio, donde la gravedad es un billón de veces mayor que en la Tierra, las desviaciones respecto de Euclides son de un 20%. De haber evolucionado allí, el recto espacio euclidiano nos parecería extraño y poco intuitivo.

## LA GEOMETRÍA DEL UNIVERSO

La relatividad general no es sólo una teoría formidablemente exitosa a la hora de confrontarse con el experimento y las observaciones, sino que sus ecuaciones tienen la posibilidad de ser aplicadas a todo el universo. Para ello debemos hacer algunas suposiciones sobre la distribución de materia a muy gran escala; suposiciones que deberán, claro está, ser enfrentadas con las observaciones. Del mismo modo como en el caso de la superficie terrestre, edificios, valles y montañas las consideramos como “pequeñas irregularidades despreciables”, comparadas con el tamaño de la Tierra, el universo a escala cosmológica luce uniforme porque estrellas, galaxias y cúmulos de galaxias son irregularidades locales, despreciables a partir de cierto tamaño en adelante. Las estimaciones indican que un cubo imaginario de unos 200 millones de años-luz de arista, colocado en cualquier lugar del universo, encerraría una muestra estadísticamente fiel y representativa del contenido de materia y energía de nuestro universo.

Muy diversas observaciones como distribución de galaxias, lentes gravitacionales y sobre todo el análisis de la radiación cósmica de microondas, nos revela que las diferentes direcciones en el espacio son equivalentes y que no hay lugares privilegiados en el universo: este es el Principio Cosmológico, pilar fundamental de la cosmología, un principio de simetría y de simplicidad que no sólo hace que las ecuaciones de los modelos de universo sean muy sencillas sino que además tiene un fuerte apoyo observacional<sup>2</sup>.

Como consecuencia de la uniformidad (máxima simetría, por ser pretenciosos) a gran escala de nuestro universo, las geometrías que califican para describir el espacio son las de curvatura constante. Si  $k = 0$  ó  $k = -1$ , el espacio es infinitamente extendido, y (si el Principio Cosmológico vale más allá de nuestro horizonte), el número de galaxias que contiene es infinito. En estos dos casos, nuestro universo observable (es decir, la parte del universo cuya luz ha tenido tiempo de llegar hasta nosotros, des-

de el big bang hasta ahora), representa una fracción nula del todo el universo.

En cambio, si  $k = +1$ , el espacio abarca un volumen finito, existirá un número finito de galaxias y el universo observable será una fracción no nula del total.

Estos espacios (euclidiano, lobachesvkiano o esférico) deben ser figurados expandiéndose simétricamente en escalas de tiempo determinada por la constante de Hubble. Actualmente el tiempo característico de la expansión es del orden de los millardos de años.

¿Cuál de estas geometrías de papel corresponde a nuestro espacio real? o dicho de otra manera ¿cuánto vale  $k$  para nuestro universo? Responder a esta pregunta es uno de los deberes de la cosmología observacional. Luego, y de ser posible, explicar porqué tiene ese valor y no otro.

## EL PESO DEL PREJUICIO

Hasta hace muy poco, ante la falta de evidencias confiables, el prejuicio a menudo disfrazado de preferencias estéticas gobernaba la elección de la geometría. Para muchos un universo cerrado ( $k = +1$ ) era estéticamente preferible. Finito pero ilimitado. Además, en ausencia de constante cosmológica, este modelo de universo detiene eventualmente la expansión y comienza a colapsar hacia un big crunch, lo que para algunos permitía la ilusión de otro comienzo.

Los más claustrofóbicos solían preferir el modelo abierto hiperbólico ( $k = -1$ ). El pintor holandés Maurits Escher pintó cuadros que son hermosas representaciones de espacios de Lobachevsky. Además, se pensaba hasta hace poco que este modelo gozaba del favoritismo de las observaciones.

Ante dos alternativas siempre se debe elegir la tercera. Otros prefieren muy diplomáticamente, el universo compromiso,  $k = 0$ . Ni curvado negativamente ni curvado positivamente, sino todo lo contrario. Aparte de la elegancia de la geometría euclidiana, argumentaban así: Como veremos más adelante, hay un parámetro llamado parámetro densidad, convencionalmente designado por la letra griega  $\Omega$ , que si es igual a uno, significa que el espacio es euclidiano. En la cosmología convencional este parámetro depende del tiempo de tal manera que si alguna vez fue menor que uno, a medida que pasa el tiempo tiende a cero y si era mayor que uno, aumenta indefinidamente. Como las mediciones actuales lo sitúan muy cerca del valor uno, (tal vez 0,4) después de 14.000 millones de años de estar cambiando, debe ser que el parámetro densidad vale uno y el espacio es euclidiano.

## COMO MEDIR LA CURVATURA DEL ESPACIO

En la ciencia y sobre todo en cosmología, los prejuicios son inevitables, pero suelen no ser buenos consejeros. Recientemente la sofisticación de las técnicas para escudriñar el universo, nos brindan una enorme cantidad de

datos científicamente valiosos como para arrinconar los prejuicios. Debemos recurrir a las mediciones, ver de qué manera podemos estimar la curvatura del espacio y rendirnos ante la evidencia observacional.

Las ecuaciones de Einstein son un vínculo entre la geometría del espacio (y el tiempo) y la cantidad de materia; o con algo más de precisión, entre la curvatura y la densidad de materia y energía. Así las cosas, conocer la geometría es en principio un asunto sencillo: medimos la cantidad de materia en un volumen grande y calculamos la densidad. Las ecuaciones de Einstein hacen el resto. El problema es que determinar observacionalmente la cantidad total de materia a escalas cosmológicas se ha revelado como un problema extraordinariamente arduo. Es precisamente aquí donde aparece la segunda protagonista de esta historia: la radiación cósmica de fondo.

### LA RADIACION COSMICA: DONDE FUEGO HUBO, CENIZAS QUEDAN

Todos hemos advertido que cuando se va la señal del cable, o el televisor no está sintonizado en ningún canal, aparece una "nieve" fluctuante en la pantalla. Una parte se debe al movimiento errático de los electrones en los circuitos. Es mucho menos conocido que en esa nieve estamos de alguna forma viendo al universo cuando aún no existían estrellas ni galaxias. Estamos detectando la radiación cósmica de fondo, que no viene de ningún lugar en particular (viene de todos los lugares) y fue emitida cuando el universo tenía apenas 300.000 años de edad, el 0,002% de su edad actual. Si el universo fuese un hombre de 50 años, estaríamos mirando su retrato a las 8 horas de nacido.

¿Cómo se interpreta esta radiación, qué nos permite conocer y qué tiene que ver con la geometría? Para responder estas preguntas establezcamos de una vez que las observaciones en cosmología deben concebirse en el contexto del big bang. Fue precisamente usando las ideas generales del big bang como en la década de los 40, George Gamow y su grupo predijeron la existencia de la radiación y calcularon que debía tener una temperatura de unos 5 K. En 1964, Arno Penzias y Robert Wilson, de los laboratorios Bell, la detectaron por azar mientras calibraban una antena de microondas para comunicación por satélite. A partir de ese momento y con una tecnología cada vez más sofisticada, se le ha venido estudiando y aprendiendo a decodificar la valiosa información que ella porta.

### ¿DE DONDE SALIO LA RADIACION?

La mayor contribución del siglo XX a la concepción del mundo es haber entendido que el universo es una entidad que evoluciona de acuerdo a ciertas leyes que debemos descubrir (¿o inventar?) y por tanto que es susceptible de ser analizado científicamente.

Como es ya *vox populi* toda la materia y la radiación de nuestro universo observable proviene de una fase enor-

memente densa, caliente y sometida a formidables presiones, que se expandió rápidamente y aún hoy, varios millardos de años después, continúa haciéndolo. La historia del universo es la historia de los diferentes procesos físicos que han tenido lugar a medida que el universo se enfría gracias a la expansión. En sus primeros años a partir del big bang el universo era un plasma formado esencialmente por protones, electrones, algunos núcleos de helio y radiación electromagnética (fotones) en equilibrio térmico. Cuando el universo cumplió 300.000 años, la temperatura del universo bajó a unos 4.000 K. A esta temperatura la energía de los fotones no es suficiente como para impedir que los electrones sean capturados por los núcleos, y por tanto se forman átomos de hidrógeno y de helio. La materia en su fase atómica es transparente a la radiación (ionizada, en cambio, interactúan fuertemente); en consecuencia, a partir de ese momento la radiación viajará libremente sólo sintiendo los efectos de la expansión, es decir, estirándose (disminuyendo su frecuencia o dicho técnicamente, corriéndose hacia el rojo). Desde la época de la emisión de la radiación (llamada desacoplamiento, recombinación, superficie de última dispersión, o etapa del divorcio), hasta ahora, el universo se ha expandido por un factor de 1.100. Proporcionalmente la temperatura de la radiación ha bajado de 4.000 K a 2,7 K, su temperatura actual.

### MIRANDO AL PASADO

Sabemos que mientras más lejos miremos, los fotones que detectamos tienen más tiempo viajando y por tanto estamos mirando el pasado. Cuando miramos el sol, lo vemos como era hace ocho minutos, que es el tiempo que se demora la luz en cubrir la distancia Sol-Tierra. Al mirar Andrómeda, la vemos como era hace 2 millones de años. Cuando "vemos" la radiación cósmica, estamos mirando la temprana infancia del universo. Es de hecho lo más lejano que podemos mirar con radiación electromagnética, porque el universo antes del divorcio entre la materia y la radiación, era opaco.

### PROPIEDADES DE LA RADIACION COSMICA

A diferencia de la radiación electromagnética emitida por ejemplo por una estación de radio, en la cual toda la energía está concentrada alrededor de una sola frecuencia, la radiación electromagnética en equilibrio térmico con la materia tiene su energía repartida de una manera muy particular en las diferentes frecuencias. Esta manera particular se conoce como espectro térmico o curva de Planck. Midiendo el pico de esta curva podemos determinar la temperatura de la radiación. El satélite COBE (Cosmic Background Explorer) ha medido con mucha precisión cómo está repartida la intensidad de la radiación cósmica en cada frecuencia. El resultado es el espectro térmico más perfecto jamás encontrado en la naturaleza, con un pico en la longitud de onda de 2 mm. (correspondiente a

las microondas), lo que permite conocer su temperatura con gran precisión: 2,725 K. El espectro planckiano conseguido por el COBE es una confirmación espectacular de que la radiación estuvo en equilibrio termodinámico con la materia.

Pero hay más sorpresas. Las propiedades de la radiación muestran una gran uniformidad cuando las estudiamos en diferentes direcciones del cielo. Por ejemplo, la temperatura de la radiación es la misma en una parte en cien mil en diferentes direcciones en la bóveda celeste. Esto nos revela entre otras cosas que la expansión es isotropa, la misma en diferentes direcciones, lo que certifica que la geometría del espacio es de curvatura constante y una uniformidad asombrosa. Pero hay todavía más sorpresas.

### BUENO ES HOMOGENEO PERO NO TANTO

Ciertamente, si el universo fue demasiado homogéneo en la época del divorcio, estaríamos en graves dificultades en trance de querer explicar cómo se formaron estructuras como cúmulos de galaxias, galaxias, estrellas, huecos negros, planetas, bibliotecas y tantos otros testimonios de un "universo diverso", interesante y capaz de albergar las complejidades que en alguna medida nos explican.

La hipótesis más sugestiva y a la vez más convincente es que estas estructuras comenzaron a constituirse a partir de leves fluctuaciones estadísticas en la distribución de la materia. En zonas donde la densidad de materia era ligeramente mayor que la media, la gravedad actuaba comprimiendo aún más esa región en contra de la tendencia expansionista del universo. Este proceso, denominado inestabilidad gravitacional, conduce de manera natural, de las pequeñas irregularidades, a la formación de estructuras: la gravitación es la gran des-homogenizadora. Por supuesto, este mecanismo debe suponer que existe un espectro inicial de perturbaciones, que sirvió de semilla para el apelotonamiento gravitacional y además debemos imaginarnos un mecanismo para detectar las irregularidades iniciales y en el mejor de los casos explicar su origen.

### "LA HUELLA DE DIOS"

El mecanismo es simple. Cuando los fotones cósmicos salen de una región más densa, pierden energía, es decir, su frecuencia disminuye al vencer la atracción gravitacional. La temperatura por tanto disminuye; de tal suerte que a la fluctuación de densidad de la materia corresponde una variación en la temperatura. Estudiando con detalle los cambios de temperatura a las diferentes escalas angulares en el cielo (técnicamente el espectro de potencias de las fluctuaciones), aprenderemos mucho sobre la distribución de las irregularidades que crecieron como grandes estructuras del universo.

En 1992 el instrumento DMR del COBE detectó las irregularidades en la distribución de la materia. El descubrimiento fue recibido con alboroto y jolgorio. Se habló del

más grande descubrimiento científico jamás realizado y que era como mirar 'la huella de Dios'. Lo cierto es que el COBE mostró que regiones separadas unos  $10^\circ$ , (más o menos el ángulo que hace nuestro puño con el brazo estirado), tenían una diferencia de temperatura de unas millonésimas de grados Kelvin, confirmando la existencia de irregularidades en el temprano universo<sup>3</sup> y, por tanto, legitimando la idea de formación de estructuras por inestabilidad gravitacional. Pero la radiación nos depararía aún más sorpresas.

### UNA ESCALA PRIVILEGIADA EN EL CIELO

Obviamente los procesos físicos sólo operan en regiones (del espacio y el tiempo) que estén causalmente conectadas, es decir, que la luz tenga tiempo de ir de una región a la otra en el tiempo dado. La distancia que recorre la luz desde el big bang hasta un determinado instante, se llama horizonte. Por ejemplo, en el instante del desacoplamiento el tamaño del universo causal (del horizonte) era de unos 300.000 años-luz. Esa distancia corresponde en el cielo aproximadamente a un grado. Las variaciones en temperatura detectadas por el COBE no son huellas de procesos físicos que tuvieron lugar en el universo, porque corresponden a regiones que nunca pudieron interactuar. Las anisotropías de la radiación debido a procesos físicos tienen que reflejarse en el cielo de microondas a escalas angulares menores a un grado.

El proceso físico más importante en la época del divorcio no fue otro que la transmisión de sonido: la materia es atraída gravitacionalmente en las zonas más densas. La competencia entre la gravedad local y la presión de la radiación causa oscilaciones en el fluido materia-radiación, es decir, genera ondas acústicas que se propagan a la velocidad del sonido en el medio. Dicho de otro modo, cada región se comporta como un oscilador: la gravedad es la fuerza que guía el proceso, la radiación se encarga de la resistencia y la tasa de expansión del universo provee la amortiguación. La longitud de onda más grande corresponde a la distancia recorrida por el sonido desde el big bang hasta el desacoplamiento, el horizonte sónico. Además hay armónicos con menores longitudes de onda.

Poco tiempo después, la interacción entre la materia y los fotones cae abruptamente, la radiación liberada viajará por el espacio en expansión, pero lleva impresa las huellas de las oscilaciones acústicas. Debemos aprender a "ver" el sonido en las fluctuaciones de la temperatura de la radiación.

### EL ESPECTRO DE LAS FLUCTUACIONES

Consideremos una cuerda vibrando. Sabemos que la vibración más general puede descomponerse como una suma de funciones sinusoidales con frecuencias que son múltiplos de la frecuencia fundamental (dada por la longitud de la cuerda). Es lo que los físicos llaman descomposición en modos normales.

Imaginemos ahora un balón gelatinoso oscilando. Las oscilaciones en su superficie las podemos describir sumando modos normales (técnicamente armónicos esféricos), que son funciones de los ángulos  $\theta$  y  $\phi$  sobre la esfera. Del mismo modo se hace la descomposición del mapa de temperaturas de la radiación:

$$\frac{\Delta T(\theta, \phi)}{T} = \sum a_{l,m} Y^{ml}(\theta, \phi)$$

La idea es tratar de obtener los coeficientes  $a$ 's de las mediciones de la temperatura (realmente es un promedio de estos coeficientes) y compararlos con los correspondientes de los modelos teóricos<sup>5</sup>. En la descomposición la suma se hace sobre un índice " $l$ ", que permite conocer el ángulo correspondiente,

$$\theta = \frac{\pi}{l}$$

El término  $l = 0$ , el término monopolar corresponde a la temperatura constante (sin fluctuaciones) de la bóveda y es  $T = 2,725$  K. El término  $l = 1$  (término dipolar) corresponde a la variación de temperaturas entre dos direcciones opuestas, es decir, un hemisferio ligeramente más caliente que el otro. Esta anisotropía dipolar es de unos 0,003 K y es un efecto del movimiento de nuestra galaxia, en el mar de microondas.

La discusión de arriba hace presumir la existencia de una fuerte anisotropía correspondiente al primer pico acústico, y luego otras correspondientes a los armónicos. La pregunta importante es: ¿a cuál ángulo aparece esa anisotropía? O equivalentemente, ¿a qué valor de  $l$  aparece el primer pico acústico?

La respuesta rotunda es: depende. En efecto, depende de la geometría del espacio, y aquí reunimos a las dos protagonistas de nuestra narración. Si el espacio está curvado positivamente, la convergencia de las geodésicas hará que el ángulo luzca mayor que si el espacio es euclidiano. En cambio, si la geometría es hiperbólica, el ángulo lucirá menor que en el caso euclidiano. El cálculo permite conocer la fórmula que vincula el valor del  $l$  asociado al primer pico acústico y la curvatura del espacio:

$$l = \frac{200}{\sqrt{1 - \frac{k}{R^2 H^2}}}$$

Muy recientemente el telescopio Boomerang hizo en la Antártida un viaje de diez días en globo, a una altura de 35 Km eludiendo así el 99% de la perturbadora atmósfera, para medir con exquisita precisión las variaciones de temperatura de las microondas. Sus imágenes cubren 2,5% del cielo y con una resolución angular 35 veces superior a la del COBE. El análisis de los datos revela que el valor observacional de  $l$  es

$$l = 198 \pm 6$$

Introduciendo este valor, ( $l = 200$ ), en la fórmula anterior, resulta claro que  $k = 0$  (o muy cercano a cero) y nuestro espacio resulta ¡euclidiano! Claro, euclidiano pero en

expansión: las distancias a escala cosmológicas aumenta a medida que pasa el tiempo, pero de manera simétrica, manteniendo siempre la curvatura igual a cero.

Este resultado ha producido una gran conmoción, ruedas de prensa, artículos en la prestigiosa revista *Nature*. Por si fuera poco, otro grupo que conduce el experimento Maxima-1, ha llegado a conclusiones similares. Para noviembre de 2000 está previsto el lanzamiento del satélite MAP (Microwave Anisotrope Probe), de la NASA, y dentro de algunos años, el del PLANCK, de la Agencia Espacial Europea. Estos satélites dispondrán de una exquisita tecnología observacional que permitirá obtener un mapa de las fluctuaciones de la radiación cósmica, con un grado de detalles sin precedentes. Con estos datos se podrá reconstruir el espectro de potencias y verificar la medición de  $k$ , obtener información sobre otros importantes parámetros cosmológicos y quien sabe si descubrir alguna otra sorpresa oculta que nos conceda la radiación de microondas.

## ALGUNAS CONSECUENCIAS

La tasa con la que el universo se expande está controlada por dos factores: la densidad de energía-materia total y la curvatura. Si como indican las observaciones, la curvatura es cero, significa que la densidad es igual a un valor que se conoce como densidad crítica, unos cinco átomos de hidrógeno en cada metro cúbico. Esta igualdad se reformula afirmando que el parámetro densidad, que es la relación entre la densidad actual y la densidad crítica, es igual a uno. Pero sucede que todas las observaciones realizadas para determinar la densidad de materia y energía del universo por métodos gravitacionales, arrojan un valor menor, apenas el 40% de la densidad crítica. Esta diferencia ha sugerido que el 60% restante corresponde a la existencia de la densidad de energía del vacío, o constante cosmológica, un término introducido en sus ecuaciones por Einstein y que posteriormente desechó. El vacío puede imaginarse como un fluido con una presión negativa y esto hace que sus efectos gravitacionales sean repulsivos a diferencia de los de la materia "normal". Si el 60% de la densidad del universo corresponde al vacío, la expansión del universo, en lugar de frenarse, debería de acelerarse. Las observaciones recientes de dos grupos de investigación, midiendo el corrimiento al rojo de supernovas lejanas, sugiere con vehemencia que nuestro universo está en una fase acelerada, y por tanto en su futuro no está previsto detener la expansión y contraerse. Por el contrario, su expansión tenderá a ser exponencial<sup>4</sup> y hemos respondido la segunda pregunta de la introducción.

La megatorta de la masa-energía del universo está repartida así:

- 5% de materia "normal" o bariónica. De este pedazo, un 75% es hidrógeno y un 24% es helio. Los átomos pesados de los que estamos hechos, carbono, oxígeno, nitrógeno, silicio ... no son precisamente los más comunes en el universo.

- Los fotones cósmicos (que en el universo temprano controlaban la expansión) a pesar de ser  $10^9$  veces más numerosos que los protones o neutrones, tienen hoy una densidad de energía muy baja y no contribuyen significativamente a la torta.
- 35% de materia oscura no relativista. Esta materia no emite radiación electromagnética, (de allí el nombre), pero su presencia se hace sentir por sus efectos gravitacionales. No conocemos su naturaleza precisa, aunque hay presuntos candidatos, vestigios fósiles de los primerísimos instantes de la expansión del universo, que han sido sugeridos por los teóricos.
- 60% de energía del vacío. No conocemos en detalle su comportamiento.

## ULTIMAS PREGUNTAS

Imaginemos que las precisas y preciosas observaciones que realizarán el MAP y el Planck, corroboran que el espacio a escala cosmológica no tiene curvatura, entonces habrá llegado el momento de preguntarnos por qué razón no tiene curvatura, cuál es el origen de que sea euclidiano.

La pregunta tiene sentido fundamentalmente porque es curioso que la geometría euclidiana sea inestable durante la expansión convencional del universo. En efecto, las ecuaciones de la cosmología establecen que si el parámetro densidad  $\Omega = 1$ , (condición para que  $k = 0$ ) en algún instante, entonces siempre será igual a uno; pero cualquier leve desviación será amplificada a medida que pase el tiempo. En otras palabras, para que actualmente  $\Omega$  esté tan cerca de uno como indican las observaciones, luego de 15 mil millones de años de expansión, significa que en los instantes iniciales tuvo que estar "sintonizado" a uno con una precisión inusual. Una posible actitud respecto de este ajuste fino es: el mundo es así, no lo he inventado yo; esas eran las condiciones iniciales. Es decir, el mundo es como es porque fue como fue. Pero atribuir una característica del universo, tan básica como es su geometría, a excepcionales condiciones iniciales, es aceptable 'mientras tanto y por si acaso' pero no es lo más elegante. Sería preferible explicar estas excepcionales condiciones iniciales como el resultado de un mecanismo físico, de un proceso que de manera natural haya conducido a ellas.

Ese mecanismo existe y se llama Inflación y fue propuesto a comienzos de los 80 por Alan Guth. De acuerdo al modelo inflacionario, en sus primerísimos instantes, aun antes de la formación de los protones y neutrones, cuando el universo estaba a una temperatura de unos  $10^{28}$  K, un campo escalar (que suelen denominar 'inflatón') presente

en el universo sufrió una transición de fase que tuvo como consecuencia una expansión exponencial del universo. Su tamaño aumentó en fracciones de segundo  $10^{50}$  veces. Para una expansión acelerada como la exponencial, el punto  $\Omega = 1$  es un punto de equilibrio estable, es decir, al cual se llega independientemente del valor inicial. Finalizada esta brevísima fase, el universo retomó su expansión prevista por la cosmología convencional.

Nuestro universo observable vendría por tanto de una región muchísimo más pequeña que si no hubiese ocurrido la inflación. No es de extrañar entonces que luzca euclidiano. En otras palabras, el crecimiento formidable del universo durante la fase inflacionaria eliminó la curvatura del espacio del mismo modo que la superficie de la Tierra luce menos curvada que la de una pelota.

Señalemos finalmente que la inflación logra explicar otros aspectos de nuestro universo, que de otra forma requeriría invocar condiciones iniciales particulares. Algunos de estos éxitos del universo inflacionario son<sup>1</sup>:

- La propia expansión que hoy atestiguamos puede ser el vestigio de la expansión inflacionaria.
- El origen de las variaciones en la densidad de materia, cuyas huellas detectamos hoy en la anisotropía de la radiación de fondo; se deben a las fluctuaciones cuánticas del inflatón
- El origen de los fotones en el universo. La radiación podría originarse en el decaimiento del inflatón al pasar del falso vacío al vacío verdadero.
- El problema del horizonte. En la expansión convencional las regiones separadas por ángulos mayores a  $10^\circ$  nunca estuvieron en contacto causal. ¿Cómo hicieron para tener la misma temperatura? Con inflación el problema desaparece porque la región que dio origen a nuestro universo era suficientemente pequeña como para estar contenida en una sola región causal.

## Finale Presto

En resumen, las próximas observaciones de la radiación cósmica de fondo tal vez señalen cuál modelo de inflación (de los muchos que hay en el mercado) es el correcto. Una mejor comprensión de la física nos permitirá dilucidar la naturaleza de la materia oscura y de la energía del vacío que hoy gobiernan la dinámica del universo. Pero acercarnos más al big bang donde quizás se esconden las más profundas respuestas a las preguntas que planteamos al comienzo de este trabajo, requerirá sin duda, inventar (¿o



descubrir?) leyes de la física que no conocemos ahora, y en particular, disponer de una teoría cuántica de la gravitación (¿supercuerdas?).

Afortunadamente la ciencia nos ha enseñado que es po-

sible conocer algo sin necesidad de conocer todo, y en estos fines de milenio hemos aprendido a leer en los fotones cósmicos la vieja y noble geometría de nuestros tormentos que alguna vez fue concebida por un viejo y noble griego.

#### REFERENCIAS

1. **Albrecht, A.** Cosmic Inflation, Jul. 2000, arXiv: astro-ph/0007247
2. **Barrow, J.** The Universe that Discovered Itself, Oxford University Press, 2000.
3. **Hu, W.** An Introduction to the Cosmic Microwave Background, [www.sns.ias.edu/~whu/beginners/intro.html](http://www.sns.ias.edu/~whu/beginners/intro.html)
4. **Livio, M.** The Accelerating Universe, John Wiley and Sons, Inc. 2000.
5. **Van der Veen, J., Lubin, P., Natoli, P. and Seiffert, M.** Small-Scale Anisotropies: The Final Frontier, The Physics Teacher, Vol. 36, Dic. 1998.