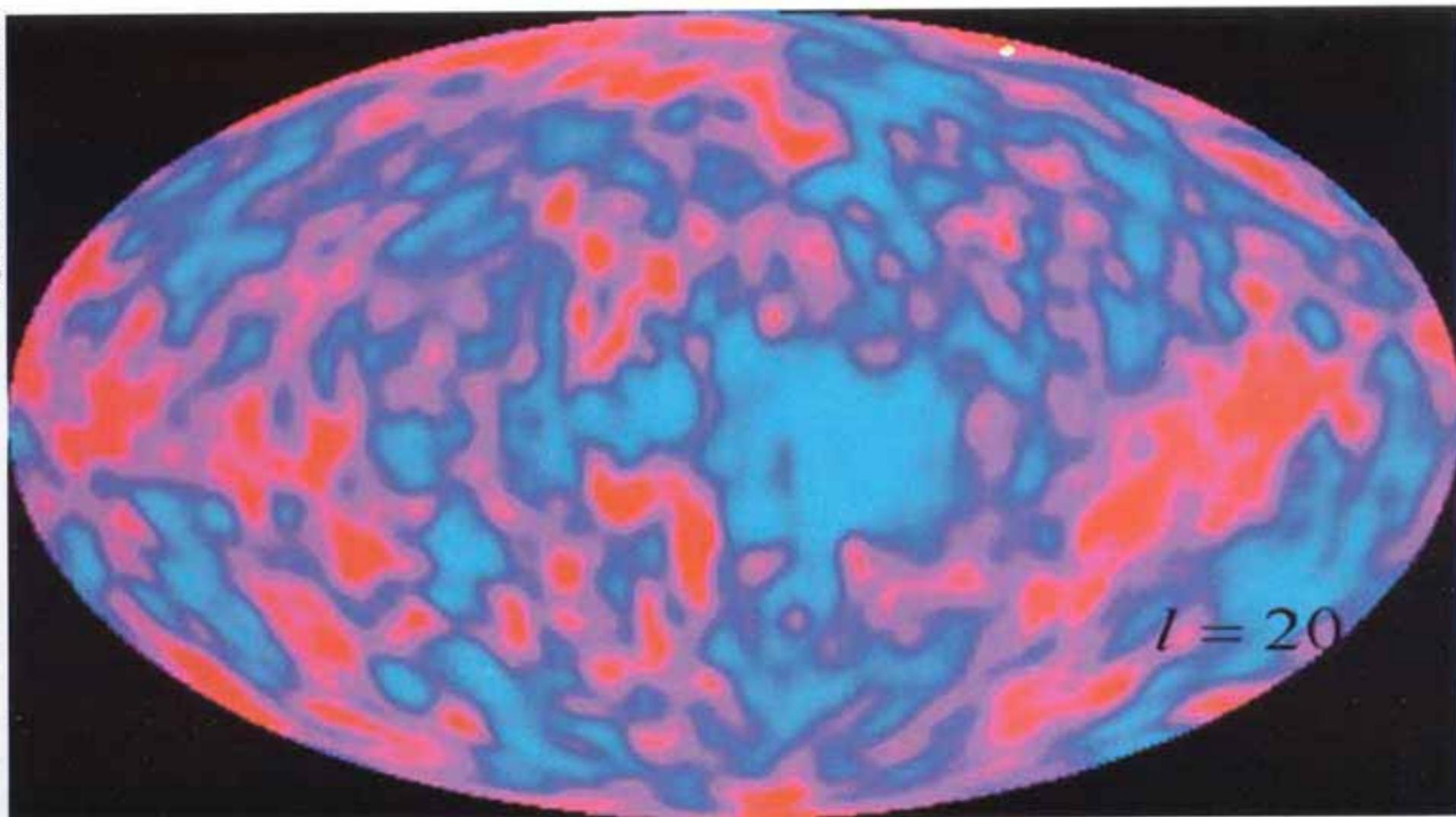


Imagen cortesía de Héctor Rago



LA GEOMETRÍA DEL UNIVERSO

La pretensión de conocer al universo y sus hábitos es tan vieja como la humanidad. La comprensión científica de algunos de sus hábitos es, sin embargo, muy reciente. La cosmología vive desde hace algunos años momentos gloriosos gracias al triple impulso de sofisticadas y precisas observaciones, comprensión de leyes fundamentales y capacidad de cálculo provisto por los avances en informática.

Muy recientemente la cosmología ha logrado responder de manera clara una pregunta fundamental y cuya respuesta nos habla de una característica objetiva del universo en que vivimos. La pregunta es ¿cuál es la geometría del espacio a escala

cosmológica? La respuesta es: la geometría del universo es euclídeana, la misma de nuestros desvelos en bachillerato, aquella de tres ejes rectos donde vale el viejo teorema de Pitágoras. Pero ¿es que había otra alternativa? La respuesta rotunda es que sí. Einstein nos enseñó que la gravitación no es más que la curvatura del espacio (y el tiempo) causada por la presencia de materia y energía. En la superficie de una estrella de neutrones, por ejemplo, la geometría deja de ser euclídeana en un 20% debido a la fuerte gravitación. Muy lejos de la materia, en cambio, donde no existe gravedad, el espacio es euclídeano. La geometría de Euclides nos parece la natural porque nuestro cerebro ha evolucionado durante miles de años en la Tierra, donde la gravedad es suficientemente débil como para que no se aprecien desviaciones de la geometría euclídeana.

La discusión sobre la geometría del universo tiene algunas similitudes con la vieja controversia acerca de la geometría de la superficie terrestre: ¿plana o esférica? En cualquiera de los dos casos se supone que estamos prescindiendo de irregularidades como montañas, valles, edificios..., pequeños comparados con distancias terrestres. La geometría es entonces (aproximadamente) uniforme, plana o esférica. Los griegos advirtieron que la extensión de la sombra de un objeto al sol a una misma hora en ciudades distantes, era diferente, y con una acertada combinación de ingenio, matemáticas y observación, concluyeron que la superficie de la Tierra es curva y predijeron un valor para el radio, muy cercano al que hoy conocemos. Actualmente las evidencias "desde afuera" nos permiten afirmar que la superficie

HÉCTOR RAGO

Centro de Astrofísica Teórica, Grupo de Física Teórica/rago@ciens.ula.ve

de la Tierra es esférica con una precisión de 0,015% debido a Everest y otras irregularidades. Nuestro universo es claramente inhomogéneo; nuestra propia existencia atestigua esa inhomogeneidad. Sin embargo, las evidencias observacionales indican que a muy grandes distancias, planetas, estrellas, galaxias y cúmulos de galaxias no son más que "pequeñas irregularidades" prescindibles a escala cosmológica. Un cubo (imaginario) de unos doscientos millones de años luz de arista contendría una muestra estadísticamente representativa del universo independientemente de donde se coloque el cubo. A gran escala nuestro universo es uniforme en una parte en 100.000; de tal suerte que la geometría debe reflejar esa simetría: debe ser la misma en todos los puntos y en todas las direcciones. Los matemáticos nos enseñan que sólo hay tres tipos de geometrías tridimensionales compatibles con la uniformidad; la euclídeana de nuestros desvelos, con curvatura cero, la esférica o de curvatura positiva y la hiperbólica o de curvatura negativa. En la primera, las líneas paralelas se ignoran fatalmente y jamás se cortan, la suma de los ángulos internos de un triángulo es 180° y su volumen es infinito. Una geometría esférica en tres dimensiones es más difícil de imaginar, pero algo ayudará imaginar que así como sobre una esfera en las dos direcciones independientes que nos movamos, regresaremos al punto inicial, en un espacio esférico, eso ocurrirá en cualquiera de las tres direcciones independientes. El volumen de este espacio es por tanto finito. Líneas paralelas en esta geometría convergen y la suma de los ángulos internos de un triángulo es mayor a 180° . Por último la geometría hiperbólica es más difícil aún de visualizar (pero las matemáticas libran por todos). En un espacio hiperbólico de tres dimensiones, líneas inicialmente paralelas divergen, la suma de los ángulos internos de un triángulo es menor a 180° , y es un espacio infinito, como el euclídeano y a diferencia del esférico. La pregunta de nuevo nos acosa: ¿cómo determinar cuál geometría corresponde a nuestro universo? No pudiendo mirar "desde afuera", debemos como el griego, buscar la huella de la curvatura de la geometría en el mundo físico.

La Radiación Cósmica:

Donde hubo fuego, cenizas quedan

En la radiación cósmica de fondo se ha descubierto muy recientemente la huella que nos permite conocer la geometría del universo. Esta radiación corresponde a la longitud de onda de las microondas, unos dos milímetros y tiene una temperatura de 2,73 grados Kelvin. En cada centímetro cúbico del universo hay unos 400 fotones de esta radiación que no viene de ningún lugar particular: su origen es cosmológico y porta información valiosísima de las primeras etapas de un universo extremadamente caliente, hoy frío y hospitalario. Recordemos que cuando miramos objetos distantes, los miramos como eran en el pasado, debido al tiempo

que la luz tarda en llegar desde el objeto hasta nosotros. Cuando miramos la estrella más próxima, la vemos como era hace cuatro años. La galaxia Andrómeda la vemos como era hace dos millones de años. Cuando vemos (con radiotelescopios) la radiación de fondo, vemos cómo era el universo cuando tenía 300.000 años de edad. La radiación ha estado viajando libremente desde entonces a medida que el universo se expande, durante 99,98% de la edad del universo. Antes de los 300.000 años, el universo era una sopa de partículas elementales y fotones tan caliente que no había estructuras, ni planetas ni estrellas ni galaxias, ni siquiera átomos. Luego de unos trescientos mil años, la expansión había enfriado suficientemente a este plasma, como para permitir la formación de átomos. Cuando se forman átomos, la materia deja de interactuar con la radiación, que en esos momentos tenía una temperatura de unos 4.000° y son los que hoy detectamos como la radiación de microondas.

La temperatura de la radiación en diferentes zonas del cielo es la misma en una parte en 100.000. Esto nos habla de lo homogéneo del universo primitivo. Pero medido con mayor precisión se han encontrado pequeñísimas diferencias de temperatura en regiones del cielo separadas menos de un grado en la bóveda celeste. Estas irregularidades o anisotropías de la temperatura son reflejo de las pequeñas fluctuaciones en la distribución de materia, y por tanto su estudio arroja luz sobre la manera como se originaron las grandes estructuras como las galaxias. Pero además nos permite dilucidar el tipo de geometría del espacio. Los modelos predicen que la mayor diferencia de temperatura debe ocurrir para una distancia bien determinada (el horizonte a los 300.000 años luego del bigbang). Esa distancia, ¿a qué ángulo corresponde en el cielo hoy? La respuesta es que depende de la geometría, porque la trayectoria de la luz es diferente en diferentes geometrías. Si la geometría es euclídeana, la teoría dice que el ángulo correspondiente a la máxima diferencia de temperatura debe ser algo menor que un grado. Con una enorme precisión eso es lo que las mediciones de muchos equipos están revelándonos. La conclusión parece inevitable y se está transformando en la más reciente unanimidad de los cosmólogos: vivimos en un universo con una geometría euclídeana en expansión. Los observadores prometen más y mejores mediciones de las anisotropías de la radiación, para que el nuevo milenio sea recordado como la época en que conocimos la geometría del universo. Este resultado tendría fuertes implicaciones para la evolución futura del universo, porque

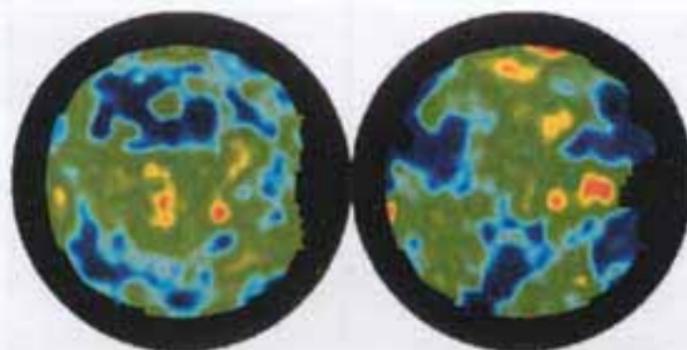


Imagen revista Mundo Científico: La Recherche N° 218

junto con otras mediciones indicaría que la mayor fracción de energía del universo corresponde a la energía del vacío, y no de la materia gravitante usual. Esto a su vez entraña que la expansión del universo, en lugar de ser cada vez menor, se va acelerando. Pero estos son temas para futuros trabajos.