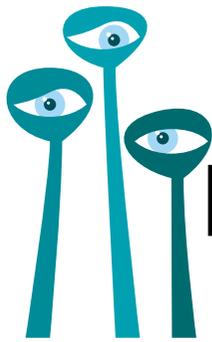


comunicaciones libres





Los misterios del Universo



George F. Smoot, Axel de la Macorra y
Jorge L. Cervantes Cota

Introducción

En una noche clara y estrellada, al observar el cielo, nos maravillamos por su gran belleza. Quizá la curiosidad nos lleve a hacernos varias preguntas. ¿De dónde proviene la luz que vemos? ¿Qué son esos objetos celestes?, ¿son estrellas? ¿Qué tan cerca o lejos están de nosotros? ¿Qué tan grande es el Universo? ¿Tuvo un principio, o siempre ha existido? ¿Qué va a pasar en el futuro? ¿Tendrá un fin?

Para responder éstas y otras preguntas, el ser humano, a lo largo de su historia, ha ordenado sus ideas en creencias místicas, religiones y ciencia. A los científicos nos corresponde intentar resolver algunos de estos misterios con la ayuda de mediciones, y usando como base las leyes de la física.

La cosmología busca comprender a nuestro Universo desde su origen hasta el día de hoy. Conocer su metamorfosis, porque no siempre ha sido como lo vemos actualmente.

En un principio no había estrellas ni planetas; ni siquiera átomos. Todo era mucho más pequeño y con una temperatura mucho más elevada. Hoy sabemos que la edad de nuestro Universo es de aproximadamente 13 700 millones de años. Si, por ejemplo, la vida del Universo constara de un solo día, en esta escala de tiempo cada segundo equivaldría a 160 000 años. Los primeros núcleos de los átomos se habrían formado en la primera billonésima parte de segundo, la primera estrella a los pocos segundos de vida, las primeras galaxias habrían aparecido a la hora con 45 minutos, y la Tierra luego de 15 horas.

Pero, ¿cómo podemos conocer la historia de nuestro Universo? Por un lado sabemos, gracias a las leyes de la física moderna, que no nos es posible viajar al pasado. Sin embargo, basta con mirar al cielo para que el pasado llegue a nosotros: eso precisamente es lo que sucede cuando observamos los objetos celestes. Tenemos la posibilidad de ver hoy no sólo cómo es actualmente el Universo cercano, sino también observar las diferentes etapas de su crecimiento.

Mirar el Sol es mirar ocho minutos atrás en el tiempo; ver el centro de nuestra galaxia es ver 50 000 años hacia el pasado, y ver a los cuásares y galaxias más lejanas es ir casi a la infancia de nuestro Universo. Debido a que la luz tiene una velocidad finita, entre más distancia haya recorrido nos trae información de tiempos más lejanos y de objetos que probablemente hoy ya no existen. Ver al espacio a diferentes distancias es como tomar fotografías a diferentes tiempos; esta información nos ha permitido reconstruir su historia.

¿Cuál es esta historia? Hoy se observan grandes estructuras de materia en el firmamento: planetas, estrellas, agrupaciones de miles de millones o billones de estrellas –que llamamos galaxias–, cúmulos de decenas y cientos de galaxias, y supercúmulos, extendidos en enormes volúmenes del espacio sideral –del orden de 10^{23} kilómetros (un 1 seguido de 23 ceros) que nos tomaría 100 000 millones de años en cruzar, si pudiésemos viajar a la velocidad de la luz.

Sin embargo, en un inicio el Universo se encontraba constreñido en una región muy pequeña, con una gran cantidad de energía a una temperatura muy alta,

y estaba formado por partículas elementales como electrones, cuarks, neutrinos y fotones. Este estado inicial *sui generis* es llamado “la gran explosión” (*big bang*, en inglés). A medida que el Universo fue creciendo y enfriándose se formaron los protones, luego los núcleos atómicos y después los átomos. Y mucho tiempo más tarde, las estrellas, planetas y galaxias.

Nuestra perspectiva del Universo ha sufrido grandes cambios a lo largo de la historia. Tan sólo hace 14 años no sabíamos de la existencia del 74 por ciento de la energía de nuestro Universo, ni que éste crece cada vez más aceleradamente. Hace 100 años, nuestra imagen era aún más incompleta e inexacta. Los científicos en esa época creían que nuestra galaxia, la Vía Láctea, constituía todo el Universo. La concebían como una isla, un gran conjunto de estrellas inmerso en un espacio vacío e infinito, que se creía eterno y estático. La idea de un Universo en expansión era impensable.

Hoy sabemos, gracias a poderosos telescopios, que la Vía Láctea es una más de las 400 000 millones de galaxias dentro de nuestro Universo observable, y cada galaxia cuenta con aproximadamente 100 000 millones de estrellas. Un número asombroso.

La cosmología a través de la historia

La concepción del cosmos ha ido evolucionando a través de los siglos y de los pueblos. Por ejemplo, antiguamente la civilización maya adoraba a diversas deidades y elementos de la naturaleza. Según los historiadores, la cosmogonía maya consistía en Xibalbá, Cab, Caan y Yakché, que eran el inframundo, el cielo, la Tierra y el mundo árbol, respectivamente.

La creación del mundo, según el calendario maya, ocurrió el 13 de agosto del año 3114 antes de nuestra era, día en que la Vía Láctea pasó del hemisferio sur al hemisferio norte. Es el Yakché o mundo árbol y sus ramificaciones superiores las que sostienen al cielo, donde radicaban los dioses, mientras que el tronco y las ramas más bajas están en la Tierra, y las raíces en el inframundo. Los antiguos mayas creían que el Sol brillaba de día y en la noche se encontraba en el Xibalbá, el inframundo, para luego volver a subir al Cab y repetir así el ciclo. Con esta cosmología y una gran com-



plejidad religiosa, los mayas construyeron una ciencia astronómica, calendarios y regularon la vida religioso-política-social de sus pueblos. En el presente 2012 se cumple un ciclo más de ese calendario.

En la historia occidental, con Aristóteles, y más tarde con Claudio Ptolomeo, se creía que la Tierra era el centro del Universo, y que alrededor de ella se movían los planetas y estrellas, situados en cascarones esféricos. Más al fondo, existían las lejanas estrellas fijas.

Fue Nicolás Copérnico, hace cinco siglos, quien formuló la idea de que no es la Tierra el centro de nuestro Sistema Solar, sino el Sol. Con Copérnico se inicia la astronomía moderna, y fue pieza clave para el renacimiento científico, que estaba en ciernes en esa época.

Poco después, Galileo Galilei, hace exactamente 400 años, construyó y observó por primera vez el firmamento a través de un telescopio, iniciando la época moderna de la astronomía. Sus primeras observaciones fueron los cuatro satélites más grandes de Júpiter, las

llamadas “lunas galileanas” –Ío, Europa, Ganímedes y Calisto– así como las montañas y valles de nuestra Luna.

Actualmente, los nuevos telescopios y satélites equipados con instrumentos sensibles de alta tecnología nos han dado una nueva visión de nuestro Universo, no sólo totalmente diferente de la de hace 100 años, sino que inclusive ha revolucionado nuestro entendimiento en la última década.

La cosmología moderna está basada en la famosa teoría de la *relatividad general*, formulada en 1915 por el físico más conocido del siglo XX, Albert Einstein, y es el pilar teórico para entender nuestro Universo. La relatividad general predice una interconexión estrecha entre la geometría del espacio y la materia-energía que éste contiene. La materia y la energía son originalmente dos conceptos diferentes, pero de acuerdo con la teoría de *relatividad especial*, también de Einstein, son convertibles entre sí; esto se desprende de la famosa fórmula $E = mc^2$.

La teoría de la relatividad general predice que la materia-energía deforman al espacio-tiempo; la curvatura de éste puede ser determinada ya sea por métodos geométricos o midiendo la cantidad total del contenido de materia-energía en el Universo. Esta interrelación entre materia-energía y geometría es esencial en la descripción de nuestro Universo.

Cuando Einstein formuló la relatividad general, se creía que la gran estructura del cosmos estaba en reposo: un Universo estático de principio a fin. Einstein intentó encontrar soluciones acordes a esta visión en su nueva teoría, pero ésta sólo proporcionaba modelos de un Universo en expansión: las deseadas soluciones estáticas no se encontraron en la formulación original de la teoría. Sólo se lograban éstas si se agregaba un elemento nuevo, permitido matemáticamente pero no contemplado inicialmente: la *constante cosmológica*. Esta constante permite varios tipos de soluciones a la relatividad general, y entre ellas está la de un Universo estático.

La teoría, así modificada, daba la explicación deseada de un Universo estático. Sin embargo, en los años veinte, Edwin Hubble determinó que el Universo estaba en expansión, mediante observaciones del movimiento de las galaxias. Esto le daba soporte a la formulación original de la relatividad general.

Einstein afirmó después que la constante cosmológica había sido “el error más grande de su vida”. Pero a la postre Einstein estaba en lo correcto al introducir la constante cosmológica, y ese “error” marcaría el advenimiento de una nueva física que nos permitiría entender la evolución dinámica del Universo actual. Sin embargo, la nueva constante cosmológica postulada hoy en día tiene efectos notablemente diferentes de la idea original de Einstein, como veremos más adelante.

Hubble midió las distancias y velocidades de galaxias cercanas y determinó que entre más lejos estaban, mayor era su velocidad; y todas estaban alejándose de nosotros. Si la distancia de una galaxia era el doble que la de otra, entonces su velocidad de alejamiento también aumentaba en esa proporción. Esta velocidad se determina fácilmente midiendo el *espectro* de la luz de las galaxias, que no es más que el arco iris que se forma al hacer pasar la luz proveniente de esa galaxia por un prisma. Hubble observó que la luz de las galaxias tiene un desplazamiento hacia el rojo, indicando pérdida de energía; de ello concluyó que estos objetos se alejan de nosotros. Este descubrimiento dio lugar al modelo de la gran explosión de nuestro Universo.

Todos los objetos se alejan entre sí, y nuestra posición no es especial dentro del Universo. El aumento en la distancia entre los objetos no es debido al movimiento relativo, sino al *crecimiento* del espacio entre ellos. Análogamente, si pintamos unos puntos en la superficie de un globo y luego lo inflamamos, los puntos están fijos sobre el globo, pero al inflarlo se separan entre sí.

La expansión del Universo no está en duda, y dado que la gravedad es una fuerza de atracción, la velocidad de la expansión debería ser cada vez menor. La desaceleración quedaría determinada por la cantidad de materia en el Universo: a mayor cantidad de masa, mayor fuerza de gravedad, y mayor la desaceleración.

Hace poco más de diez años, el dilema que teníamos los cosmólogos era saber si la cantidad de masa en el Universo era suficiente para detener su crecimiento y hacerlo recolapsar hasta llegar al “gran colapso” (*big crunch*), o si por el contrario el Universo crecería para siempre. Sin embargo, uno de los resultados más sorprendentes en la última década ha sido la observación de que nuestro Universo no sólo está creciendo, sino

que lo hace de una forma *acelerada*. Esto se determinó en 1998 gracias a las mediciones de supernovas de tipo Ia –que son grandes explosiones de estrellas–, realizadas simultáneamente por los grupos *Supernova Cosmology Project* (SCP) y *High-Z Supernova Search Team* (HZT), cuyos líderes Saul Perlmutter, por un lado, y Brian Schmidt y Adam Riess, por el otro, fueron galardonados con el premio Nobel de Física en 2011.

Con las supernovas se pudieron determinar distancias y velocidades de objetos muy lejanos, y esto permitió concluir que el Universo no sólo crece, sino que lo hace aceleradamente desde tiempo atrás. Este extraño comportamiento implica que debe haber algo muy diferente a lo que conocemos en el Universo, que lo domina y tiene una gran fuerza de repulsión antigravitacional. A este misterioso “algo” le hemos llamado *energía oscura*. “Energía” porque es un ente no localizado en una región limitada del espacio –como sí lo está la materia–, sino que está distribuida en todo el Universo –de hecho, constituye 74 por ciento del total de la materia–. Y “oscura” porque no la podemos ver; no emite luz, y esto nos obliga a inferir sus propiedades de forma indirecta, aunque certera, basándonos en la teoría. La energía oscura bien podría ser simplemente la famosa constante cosmológica sobre la que Einstein había especulado “erróneamente” hace ya casi un siglo, pero sus consecuencias serían totalmente diferentes: no produciría a un universo estático; sino por el contrario, le generaría un crecimiento acelerado.

Pero si hay tanta energía oscura en comparación con el resto de la materia-energía del Universo, ¿por qué no la habíamos percibido antes de 1998? ¿Por qué no la detectamos en la Tierra? La razón es que la energía oscura, al contrario de la materia ordinaria, no forma “grumos”: no hay planetas ni asteroides de energía oscura, y esto la hace mucho más difícil de observar. Aunque la energía oscura representa un porcentaje muy alto de la energía del Universo, su densidad es sumamente pequeña. Si, por ejemplo, la Tierra estuviera constituida en su totalidad por energía oscura, pesaría menos que una pluma de canario (menos de una centésima de gramo). Por tanto, la energía oscura sólo se puede observar a distancias y volúmenes muy grandes.

A pesar de que la energía oscura no tiene grandes consecuencias dentro de nuestro Sistema Solar, y mu-

cho menos en la Tierra, su efecto total genera la fuerza más intensa que hay en el cosmos: de hecho, genera espacio nuevo entre las estrellas, galaxias y cúmulos, alejándolos aceleradamente unos de otros.

Otra de las grandes incógnitas que ha surgido debido a la energía oscura es saber por qué se manifiesta ahora; es decir, en tiempos cercanos, y no en el Universo temprano ¿Es acaso una coincidencia? Al comparar con otros sucesos importantes en la cosmología, vemos que cuando se formaron las primeras estrellas, el Universo era 20 veces más chico; cuando aparecieron los primeros átomos, 1 000 veces más chico, y cuando se integraron los primeros núcleos atómicos, el Universo era 10 000 millones de veces más chico que hoy. La energía oscura, en cambio, sólo se manifestó cuando el Universo tenía la mitad de su tamaño actual. Parecería que vivimos en una época privilegiada, y esto va en contra de nuestro principio cosmológico, a menos de que encontremos una explicación satisfactoria.

De hecho, si la energía oscura hubiera aparecido antes de la formación de las primeras estrellas, éstas no se hubieran podido formar nunca (y por ende no podríamos estar leyendo este texto). Nuestro planeta y Sistema Solar se formaron de polvo de estrellas que nacieron, vivieron y explotaron previamente en este mismo lugar del espacio. Estas estrellas generaron en su interior toda la gama de elementos pesados de la tabla periódica, como oxígeno, nitrógeno y carbono, que por supuesto son parte de los elementos que forman nuestros cuerpos: estamos hechos de polvo de estrellas.

La radiación cósmica de fondo

Posiblemente el medir la luz de la radiación cósmica de fondo es uno de los logros tanto observacional como teórico más importante. La radiación cósmica de fondo es una huella dactilar del Universo: nos da información no sólo del tiempo en que se formó, sino también de las condiciones iniciales del Universo mucho antes de su primer segundo de vida. Por si fuera poco, dado que esta luz viene de distancias tan remotas y por tanto de momentos tan lejanos, en su viaje hasta nosotros va recabando a su paso información de las propiedades del Universo.

Las características generales de esta importantísima huella dactilar fueron calculadas teóricamente antes de su observación, usando el modelo de la gran explosión. La luz de la radiación cósmica de fondo proviene de la región más lejana y por tanto de la época más temprana de nuestro Universo que podremos jamás ver, sin importar cuán potentes sean los telescopios o satélites futuros. Esto se debe a que toda la luz que había antes de ese momento interactuaba con los electrones y protones de manera muy eficiente, y por ello dejó de existir; aunque se generaba nueva luz, iba dejando un medio opaco hacia el pasado.

A medida que el Universo se fue enfriando, su temperatura bajó lo suficiente y la luz dejó de interactuar y pudo viajar libremente. Mientras, los electrones libres se combinaron con los protones formando átomos neutros de hidrógeno (un protón y un electrón), los primeros átomos del Universo. Cuando esto sucedió, el Universo tenía 380 000 años de existencia.

La radiación cósmica de fondo fue medida en 1964 por Arno Penzias y Robert Wilson. Ellos observaron un ruido en su antena de microondas, y después de examinar posibles fuentes de ruido en la antena (¡incluso hasta el excremento de palomas!), dedujeron que era un ruido observado, proveniente de una fuente celeste de origen extragaláctico. Recibieron el premio Nobel de Física en 1978 por este descubrimiento. La temperatura medida fue aproximadamente de $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$, tres grados sobre el cero absoluto.

El tiempo pasó, y hacia finales de los ochenta se llevó a cabo una versión moderna del experimento de Penzias y Wilson. Este experimento fue dirigido por uno de los autores de este artículo, George F. Smoot y sus colaboradores; fue realizado con el satélite *Explorador del fondo cósmico* (COBE, por sus siglas en inglés). Así comenzó una nueva era experimental de alta precisión en cosmología.

El equipo del COBE reveló a principios de los noventa, con gran exactitud, que el Universo es *homogéneo* e *isotrópico* (sus propiedades no varían en sus diferentes puntos), aunque no totalmente. Las minúsculas anisotropías de una parte en 100 000, descubiertas por el COBE, fueron las responsables de la posterior formación de estrellas, galaxias, cúmulos de galaxias, y de todas las macroestructuras de nuestro Universo ac-



tual. Además, COBE encontró que la radiación cósmica de fondo presenta un *espectro de cuerpo negro*, lo cual indica que el Universo temprano estuvo en equilibrio termodinámico, con (casi) la misma temperatura en todos lados y en un estado homogéneo.

Éstos fueron dos de los más importantes descubrimientos en la astronomía del siglo XX, motivo por el cual George F. Smoot y John Mather recibieron el premio Nobel de Física 2006. El satélite COBE y otras pruebas cosmológicas, como los globos aerostáticos BOOMERANG y MAXIMA, lanzados en la Antártida a finales de los noventa, y más recientemente el satélite WMAP, lanzado en 2001, han confirmado estas características peculiares del origen de nuestro Universo.

La radiación cósmica de fondo no sólo trae información de las fluctuaciones primordiales del Universo, sino también de su comportamiento en esa época. Diferentes regiones del espacio del Universo sufrieron

oscilaciones en su crecimiento, debido a la interacción entre los protones, electrones y la luz justo antes de que se formaran los átomos de hidrógeno. La competencia entre la fuerza de gravedad, que trata de juntar a todas las partículas, y la presión de la luz, que lucha en contra, generó estas oscilaciones.

Por ejemplo, imaginemos que brincamos varias veces con unos resortes en los pies. Nuestro peso comprime los resortes hasta que el resorte gana y rebotamos, para luego caer y volver a comprimir el resorte, y así sucesivamente. En este ejemplo, nuestro peso representa a la fuerza de gravedad, el resorte juega el papel de la presión de la luz, y los brincos son las oscilaciones de la materia y energía contenida en el cosmos. Así le sucedió al plasma primordial, y eso imprimió en la luz y en la materia una huella dactilar única.

Las oscilaciones de la luz fueron predichas mucho tiempo antes de que fueran medidas, pero las oscilaciones de la materia fueron calculadas recientemente, y también fueron ya observadas en 2004: otro sorprendente y muy bello éxito de la ciencia.

Finalmente, uno de los principales resultados de las mediciones de la radiación cósmica de fondo es que se pudo establecer que la curvatura de nuestro Universo es plana, con tres dimensiones espaciales rectilíneas.

En mayo de 2010 fue lanzado el satélite Planck, que realiza una labor similar a la de WMAP, y con el cual se pretende mejorar en al menos un orden de magnitud la precisión de las mediciones de los parámetros cosmológicos, para así poder explorar los confines más recónditos de nuestra propia existencia: el origen mismo de nuestro Universo.

El WMAP sólo puede analizar el 10 por ciento de la información contenida en la radiación cósmica de fondo y de la polarización de las ondas de luz. Planck, en cambio, tiene tres veces más resolución y diez veces más sensibilidad, por lo que permitirá medir los diferentes modos polarizados de la luz de la radiación cósmica de fondo, entre ellos los famosos modos B de polarización, nunca antes medidos, que nos darán información sobre la primera trillonésima de trillonésima de segundo (10^{-36} segundos) de vida de nuestro Universo.

En esta época, el Universo entró en una época de expansión acelerada que llamamos *inflación*, muy parecida a la expansión acelerada de nuestro Universo hoy

en día. Durante la inflación se crearon las perturbaciones primordiales que posteriormente dieron lugar a la formación de estructuras, y también se perturbó el espacio-tiempo mismo, generando ondas gravitacionales.

Mucho tiempo después, la luz de la radiación cósmica de fondo es dispersada por estas ondas gravitacionales, generando así los modos B de polarización de la luz que proviene de la superficie de última dispersión. De esta sutil manera, Planck podría medir indirectamente estas ondas primordiales que permitirán conocer la dinámica del Universo temprano.

Otra de las metas del satélite Planck es determinar con gran exactitud la estructura a gran escala y la expansión del Universo a diferentes tiempos. Esto nos llevará a determinar la evolución de los diferentes componentes de energía, su origen y naturaleza, y en especial de la energía y de la materia oscuras.

Los entes misteriosos

Las estrellas, planetas, asteroides y gas interestelar forman sólo el 4 por ciento de la materia de nuestro Universo. La contribución de la luz es mucho menor aún: sólo una cienmilésima de la cantidad total.

La mayor parte del contenido del Universo, el 96 por ciento, está conformado por dos enigmáticas sustancias que no nos son familiares en la Tierra: la *materia oscura*, que corresponde al 22 por ciento, y la *energía oscura*, de la que ya hablamos, que constituye el 74 por ciento de la materia-energía del cosmos. Sabemos que ambas son muy importantes para el desarrollo de nuestro Universo, a pesar de que no comprendemos cabalmente su dinámica, ni mucho menos su origen o sus consecuencias.

Probablemente éste es el tema de mayor importancia y con mayor actividad en la física actual. Por un lado, se están construyendo nuevos y poderosos telescopios y satélites para determinar con mucho mayor precisión las propiedades de nuestro Universo y la dinámica de la materia y la energía oscuras. Por otro lado, los científicos tratamos de elucidar el origen y naturaleza de este sorprendente 96 por ciento de energía-materia del Universo.

Y entonces, ¿qué son la materia y energía oscuras? ¿Podrían ser partículas elementales que no hemos po-

dido observar en la Tierra? ¿Es incorrecta la teoría de la relatividad general a escalas cósmicas, y habrá que modificarla? ¿Son la materia y la energía oscuras manifestaciones de un espacio con más dimensiones, como predicen las teorías de *branas* (membranas) y supercuerdas? Históricamente, las grandes incógnitas han tenido diferentes tipos de soluciones. Por ejemplo, en los años treinta se pensaba que en la interacción entre partículas elementales como protones, neutrones y electrones no se conservaba la energía total, por lo que se supuso que había una partícula desconocida que se llevaba la energía faltante, o bien que las leyes de la física tendrían que ser modificadas, de forma que la conservación de la energía no se cumpliera a estas escalas tan pequeñas. Otro ejemplo: a finales del siglo XIX fue la medición de la velocidad de la luz la que no mostraba las variaciones predichas por la teoría. En este caso, o bien las mediciones eran incorrectas, o la teoría tenía que ser modificada.

La solución a estos dos enigmas fue completamente inesperada. En el primer caso, se postuló una partícula extra para conservar a la energía, el *neutrino* (que fue descubierto 15 años después, en 1956). En el segundo, la solución fue postular una nueva teoría: la de la relatividad especial de Einstein, en 1905.

En cosmología, actualmente no contamos con una respuesta final: tendremos que postular la existencia de partículas de materia y de energía oscuras, o bien tendremos que modificar las leyes de la física. Serán las futuras observaciones y datos cosmológicos, así como el poder de predicción de cada una de estas teorías, lo que permitirá determinar cuál es la solución correcta. Las evidencias hoy en día apuntan hacia la existencia de las partículas de materia oscura, pero hay menos pistas sobre el origen de la energía oscura.



Aunque su nombre se parezca, la materia oscura y la energía oscura no podrían ser más distintas. Por un lado, la materia oscura se postula para explicar la mayor fuerza de gravedad que existe entre los objetos celestes; y por el otro, la energía oscura tiene propiedades diametralmente opuestas, pues genera una gran fuerza repulsiva o antigravitacional. Este comportamiento aparentemente contradictorio no es lo único: la manifestación de cada una se da en escalas muy diferentes. La materia oscura se manifiesta a distancias mucho menores que la energía oscura. La materia oscura es relevante a distancias menores a 30 millones de años luz, mientras que la energía oscura se manifiesta a distancias 100 veces mayores, que corresponden a una décima parte del tamaño de todo el Universo visible.

Como explicamos, el concepto de energía oscura surgió para entender la expansión acelerada del Universo, mientras que la materia oscura fue postulada y tiene su origen en la necesidad de explicar la diferencia entre la cantidad de masa gravitacional inferida por el movimiento de estrellas o galaxias y la cantidad de masa observada.

Veamos esto con más calma. Usando las leyes de gravitación podemos pesar al Sol, como si usáramos una báscula, conociendo la distancia de la Tierra al Sol y el tiempo de rotación, que es de un año. Con el mismo principio podemos pesar a la Tierra usando la distancia y velocidad de rotación de la Luna, y también nos permite determinar la cantidad de masa de una galaxia usando el movimiento de las estrellas alrededor del centro de ésta. La conclusión que se obtiene a partir del estudio del movimiento de los objetos celestes es que, a nivel del cosmos, debe de haber cinco veces más materia que la masa observada en los planetas, estrellas, gas interestelar, galaxias y demás estructuras del cosmos. Usando los resultados de la radiación cósmica de fondo y de la síntesis primordial de los elementos químicos del Universo, se llega también a la misma conclusión: la materia faltante no puede estar hecha de protones y neutrones, es decir, de materia ordinaria, y corresponde al 22 por ciento del total.

Otros análisis estadísticos de esta distribución de materia en el Universo, así como los resultados de simulaciones cosmológicas de muchos cuerpos, indican que el Universo observado es consistente con un mo-

delo que está compuesto por un 74 por ciento de energía oscura, 22 por ciento de materia oscura y 4 por ciento de materia ordinaria (átomos formados por protones y neutrones). Es decir, nuestro modelo cosmológico nos permite predecir, a partir de las diminutas fluctuaciones primordiales, la formación, cantidad y distribución de estrellas, galaxias y cúmulos de galaxias, resultado nada trivial. Y en el modelo, la existencia de energía oscura y de materia oscura son, una vez más, esenciales.

Futuros estudios más detallados, como el experimento BigBOSS —en el que participamos los tres autores de este artículo—, medirán decenas de millones de espectros galácticos y cuásares para elucidar de manera más fina la estructura a gran escala del Universo. Paralelamente, simulaciones numéricas cosmológicas permitirán determinar las propiedades esperadas de modelos teóricos de la materia y la energía oscuras a diferentes tiempos, con lo que obtendremos señales inequívocas de su dinámica y naturaleza.

Conclusiones

Como hemos visto, para elucidar los misterios del Universo es necesario un gran poder de observación, dado que son las mediciones las que, al final, darán su veredicto.

Sin embargo, la comprensión de estas mediciones requiere un lenguaje adecuado para interpretarlas, y es ahí donde la física teórica entra en juego. El cosmos es el único y extraordinario laboratorio que delimita a las teorías en su conjunto, desde la microfísica (teoría cuántica de campos y partículas elementales) hasta la macrofísica (relatividad general). Gracias a ellas, podemos extraer sus secretos más profundos.

La precisión de las mediciones de los últimos años nos ha confirmado que el cosmos empezó muy pequeño, caliente, homogéneo y casi isotrópico, y con el paso del tiempo ha ido creciendo, enfriándose y se han ido formado grumos de materia (estrellas, galaxias y cúmulos de ellas). Un gran éxito para nuestro modelo de la gran explosión. Sin embargo, estas mismas observaciones nos han llevado a postular la elusiva materia oscura y la enigmática energía oscura. Seguramente el entendimiento de estas sustancias nos dará enormes

sorpresas sobre las que hoy, en el mejor de los casos, no podemos más que especular. Dejemos que sean el poder de las teorías físicas, en conjunto con las futuras observaciones, las que den la última palabra y nos develen los misterios del Universo.

George F. Smoot es estadounidense. Físico y astrónomo, doctor en física por el Massachusetts Institute of Technology y profesor en la Universidad de California en Berkeley. Es investigador del Lawrence Berkeley National Laboratory y director fundador del Berkeley Center for Cosmological Physics. Fue galardonado, junto con John C. Mather, con el premio Nobel de Física en 2006 por los descubrimientos de las anisotropías de la radiación cósmica de fondo, así como su comportamiento de cuerpo negro, realizados con el satélite COBE. Es miembro de la AMC.

Axel de la Macorra es licenciado en física por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), maestro en ciencias por la Universidad de Cambridge, Inglaterra, y doctor en física por la Universidad de Oxford, Inglaterra. Es director fundador del Instituto Avanzado de Cosmología y jefe de Departamento de Física Teórica del Instituto de Física de la UNAM. Sus áreas de investigación son las partículas elementales, la cosmología y la física fundamental. Es miembro de la AMC.

macorra@fisica.unam.mx

Jorge Luis Cervantes Cota es licenciado y maestro en ciencias físicas por la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, y doctor en ciencias naturales por la Universidad de Konstanz, Alemania. Es miembro fundador del Instituto Avanzado de Cosmología, e investigador del Departamento de Física del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ). Trabaja en el área de gravitación, astrofísica y cosmología.

jorge.cervantes@inin.gob.mx

Lecturas recomendadas

- Guth, Alan (1998), *The inflationary Universe*, Basic Books.
 Nicolson, Iain (2007), *Dark side of the Universe: dark matter, dark energy, and the fate of the cosmos*, The Johns Hopkins University Press.
 Smoot, George y Keay Davidson (2007), *Wrinkles in time: witness to the birth of the Universe*, Harper Perennial.
 Weinberg, Steven (2009), *Los tres primeros minutos del Universo*, México, Alianza Editorial.