

estructura y evolución del universo

FRANCISCO SÁNCHEZ MARTÍNEZ

La gran aventura

Desde que el hombre es *sapiens* ha mirado e interrogando al cielo con sumo interés y sobrecogimiento. Cosa bien natural puesto que lo que sucede sobre nuestras cabezas nos afecta y mucho. Los hombres primitivos palpaban de manera directa la influencia de los cielos en sus vidas, tan expuestos como estaban a la naturaleza, y tan dependientes de la muerte y resurrección del Sol, de la Luna y las estrellas que marcaban los ritmos de días y noches, y de las estaciones. Ellos aprendieron a predecir mirando la situación de los astros, pues necesitaban conocer lo que iba a pasar para poder procurarse la comida y evitar, a su vez, ser comidos por los otros predadores. Imaginemos, por otra parte, el estupor y el espanto que producirían a nuestros ancestros los imprevistos y dramáticos fenómenos que observaban en las alturas: rayos, truenos, auroras polares, estrellas fugaces, bólidos, cometas, eclipses de Sol y de Luna. ¿Cómo no ver en ellos señales de seres muy superiores? Lógico que pusiesen en los cielos la morada de sus dioses. Algunos se dieron cuenta enseguida de cómo el conocer los secretos de tales fenómenos, haciendo creer a los demás en su capacidad de usarlos en beneficio o maleficio de unos y otros, les confería gran poder y carácter de mediadores divinos. Por eso, aun en las civilizaciones más arcaicas, aparecen mitos, ritos y augurios celestes, guardados por las castas sacerdotales. Pero aún hoy, en las más desarrolladas y tecnificadas sociedades de nuestro siglo XXI, colean estos primitivismos en forma de astrolo-

gía, sectas astrales y demás supercherías. Y hasta las teorías y modelos cosmológicos científicos más complejos y especulativos, son vividos y defendidos por muchas de las personas cultas de nuestro mundo con fanatismo religioso. Todo esto hay que tenerlo presente cuando se trate de hacer, como yo ahora, una puesta al día, necesariamente sintética y asequible, de lo que en estos momentos sabemos sobre la estructura y evolución del desmesurado Universo al que pertenecemos.

Lo primero que hay que recordar y subrayar, para poner en su sitio lo que diré a continuación, es que todo conocimiento científico es provisional y está permanentemente sujeto a revisión. Y que, además, lo que voy a contar son especulaciones con base científica rigurosa, pero especulaciones al fin, que tratan de dar explicación a lo que hasta estos momentos hemos podido observar con los telescopios e instrumentos más avanzados. La realidad completa del inconmensurable Cosmos nos es inasequible, por nuestra propia finitud. En definitiva, que siendo mucho, muchísimo, lo que sabemos, es muchísimo más lo que aún ignoramos. He tenido que vencer la tentación de escribir en esta puesta al día, junto a cada aseveración, el racimo de preguntas incontestadas que la envuelven. Estas profundizaciones hay que dejarlas para libros especializados.

Dicho todo esto, aún resulta más emocionante contemplar la aventura inacabada y bella de los humanos avanzando a ciegas, pero decididos, tras los misterios infinitos, impelidos por su curiosidad y su afán innato por conocer

Página anterior:

Figura 1. En esta imagen dos galaxias espirales –NGC2207 e IC2163– se encuentran en su fase inicial de interacción. Con el tiempo, ambas galaxias terminarán formando una sola. Las fuerzas de marea gravitatoria de NGC2207 han torcido la forma de IC 163, que expulsa estrellas y vierte gases en serpentinadas largas que sobresalen cien mil años-luz por el borde derecho de la imagen. Así se han ido formando las grandes galaxias espirales. Nuestra propia galaxia, la Vía Láctea, ha asimilado en el pasado galaxias menores y está engullendo actualmente otras. En un futuro llegaremos a chocar con M31, la mayor de las galaxias espirales de nuestro Grupo Local. (Créditos: NASA)

que nos ha hecho capaces de superar nuestras fuertes limitaciones hasta cotas impensables. Por ejemplo, en el caso concreto del sentido de la vista, siendo unos bichos bastante cegatos, incapaces de distinguir objetos lejanos, y limitadísimos en el rango de longitudes de onda del espectro electromagnético que nos es asequible, hemos sido capaces de inventar unas «prótesis» maravillosas, que son los telescopios, para lograr «ver» objetos celestes que están a distancias tan enormes que tenemos que medirlas en miles de millones de años luz.

Según ha ido aumentando nuestra capacidad de «ver», de observar más lejos y con más detalle, nuestra idea del Cosmos ha ido cambiando, y lo ha hecho drásticamente en los últimos tiempos (figura 2). Por no remontarnos demasiado en la historia, retrocedamos sólo hasta el Renacimiento, a la época de la «revolución copernicana», que quitó a la Tierra del centro del Universo, después de reducirla a un cuerpo redondo girando en torno al Sol, y nos mostró que el material celeste era de nuestra misma naturaleza. No más divino que el propio polvo terrestre. Durante unos pocos siglos anduvimos maravillados con estas cosas tan insólitas y fantásticas, y entretenidos con la precisa mecánica celeste estudiando los movimientos de los cuerpos de nuestro Sistema Solar. Consecuentemente, se creía en la perfección del reloj cósmico y la inmutabilidad del Universo.

Solo hace menos de un siglo, toda esta perfección y serenidad se nos vino abajo. Confirmada científicamente la existencia de otros muchos «universos islas» situados fuera de nuestra Vía Láctea —hasta entonces el único enjambre de estrellas y nebulosas rodeado por el vacío infinito—, y que la separación entre ellos aumentaba más velozmente cuanto más lejos estaban, se tuvo que aceptar la expansión del Universo: un Universo que aumenta de tamaño y se va enfriando. Bastaba dar marcha atrás a tal expansión para llegar a la singularidad original, y de ahí a la Gran Explosión origen de todo. Añadiendo a esto el descubrimiento de la energía que hace brillar las estrellas, se tuvo que aceptar que el Universo entero está en permanente evolución. Ni estático ni eterno, en él todo está «vivo», también las estrellas y las galaxias. Por eso vemos por doquier nacer y morir objetos celestes, en procesos de transformación y reciclaje perpetuos.

Y de repente, nos llega la sorpresa de un Universo en expansión ¡acelerada! Y de nuevo patas arriba la cosmología. Este aceleramiento global fuerza a recomponer de arriba abajo el edificio de la física cósmica, y a pensar en algún tipo de energía misteriosa, ligada a lo que llamamos vacío, que lo llena todo y lo empuja todo. Energía que produce fuerzas antigravitatorias capaces de contrarrestar la implosión prevista y, además, con enorme poder para acelerar la expansión del espacio.

Vamos ahora juntos a recorrer la sendita abierta por la ciencia en el conocimiento de la estructura y evolución del Universo al que pertenecemos.

El Universo se acelera

Uno de los grandes problemas prácticos para explorar los confines del Universo es la determinación precisa de distancias. Sin entrar en tecnicismos, diremos que con las supernovas tipo Ia —estrellas terminales cuyo brillo intrínseco es prácticamente igual para todas ellas— usándolas como «candelas» patrones se consigue poner distancia a galaxias lejanísimas. El concepto es simple: si todas brillan igual en origen, el brillo aparente que observamos desde la Tierra nos da la distancia a la que se encuentra la supernova y, naturalmente, la de la galaxia a la que pertenece.

Por este camino, los grupos de investigación dirigidos por Saul Perlmutter y Adan Riess, pudieron determinar, independientemente, las distancias de las galaxias donde se producían estos tipos de explosiones de supernova, y comparando los datos así obtenidos con los corrimientos al rojo de dichas galaxias —que miden la expansión del Universo—, se toparon con la sorpresa de que dicha expansión era más lenta cuanto más lejanas estaban las galaxias. O dicho de otra forma: el Universo se expandía más despacio en el pasado que hoy día. En fin, que el Universo está gobernado actualmente por una expansión acelerada.

Estas observaciones de los grupos de Perlmutter y Riess constituyen el primer dato observacional de que el ritmo de expansión del Universo no ha sido el mismo a lo largo de su prolongada historia. Hecho de enorme trascendencia, como luego veremos.

Pero antes de seguir adelante, detengámonos un momento en el concepto de expansión del Universo, el cual, aun siendo uno de los conceptos fundamentales de la ciencia moderna, es uno de los peor entendidos. La mayoría de la gente se imagina que la Gran Explosión es como la de una bomba gigantesca, que explosiona en un punto del espacio y, desde él, la materia resulta expelida hacia afuera, debido a las diferencias de presión en la deflagración. Pero la Gran Explosión de que hablamos los astrofísicos no fue una explosión «en el espacio», fue una explosión «del espacio», matiz este verdaderamente importante. En este tipo de explosión tan peculiar, densidad y presión se mantienen constantes en el espacio, aunque decrecientes en el tiempo.

Se suele emplear para visualizar esto de la explosión del espacio el símil del globo que, al inflarse, hace que los detalles de cualquier cosa que esté sobre su superficie se vean separándose unos de otros: en la superficie del globo, todo se aleja de todo. Esta imagen bidimensional es muy gráfica, pero tiene el problema de que puede hacer creer que, al igual que en el globo, también hay un centro, un punto, de donde dimana la Gran Explosión. Pero resulta que la Gran Explosión sucedió en todos los puntos del espacio a la vez, no en ninguno determinado, de acuerdo con la teoría general de la relatividad de Einstein. Según los modelos más aceptados, el Universo no requiere ni un centro desde el que dilatarse, ni espacio vacío que lo envuelva para expandirse. Ni siquiera necesita de más de



Figura 2. Así vemos el Universo lejano mediante una «lente gravitatoria». El cúmulo de galaxias Abell 2218 es tan masivo que es capaz de curvar los rayos de luz creando imágenes a la manera de una lente. Los arcos que apreciamos son imágenes distorsionadas de galaxias mucho más lejanas que el propio cúmulo. Este efecto amplificador permite penetrar profundamente en el Cosmos, ver más lejos. (Créditos: NASA)

tres dimensiones, pese a que algunas teorías, como la teoría de cuerdas, precisan algunas más. Su base teórica es la Relatividad, la cual establece que al espacio le bastan tres dimensiones para poder expandirse, contraerse y curvarse. Por otra parte, no debe imaginarse que la singularidad que dio origen a la Gran Explosión fue algo pequeño, el «átomo inicial» del que se habla a veces. Y ésta se genera independientemente de cual sea el tamaño del Universo, ya sea éste finito o infinito.

Recordemos ahora que los átomos emiten y absorben luz a ciertas longitudes de onda bien concretas, estén en un laboratorio o en las galaxias más lejanas. Pero en este segundo caso las observamos desplazadas hacia longitudes de onda mayores —corrimiento hacia el rojo—. Lo que sucede es que, a medida que el espacio se expande, las ondas electromagnéticas se estiran, o sea: se hacen más rojas. Y este efecto permite medir la velocidad con que se separan las galaxias unas de otras, conocida como velocidad de recesión. Conviene subrayar que este desplazamiento al rojo cosmológico no es el corrimiento Doppler normal que se produce dentro del espacio, y sus fórmulas también son diferentes.

Pese a la expansión generalizada del espacio hay galaxias, como nuestra vecina Andrómeda, que se nos están

acercando, que parecen no seguir esta ley. Son excepciones aparentes, causadas porque en las cercanías de las grandes acumulaciones de materia prepondera la energía gravitatoria, que hace girar a estos gigantescos enjambres de estrellas unos en torno a otros. Las galaxias lejanas también presentan estos efectos dinámicos locales, pero desde nuestra perspectiva tan lejana, quedan encubiertos por sus grandes velocidades de recesión.

Para mayor complicación resulta que el Universo no sólo está expandiéndose, sino que además, lo hace aceleradamente. Situación que ha hecho resucitar la constante que Einstein introdujo en su Relatividad General para mantener el paradigma de Universo estacionario. Mientras se creía que vivíamos en un Universo en deceleración, era lógico pensar que con el tiempo podríamos observar más y más galaxias, pero en un Universo acelerado tiene que acontecer lo contrario. El horizonte cósmico de sucesos, determinado por la finitud de la velocidad de la luz y el aumento de la velocidad de recesión del espacio, marca una frontera, más allá de la cual sucederán fenómenos que nunca veremos, porque no nos puede alcanzar la información que emitan. Al ir acelerándose la expansión del espacio, paulatinamente irán desapareciendo de nuestra visión una galaxia tras otra, empezando por las más lejanas.

Energía oscura

El hecho del Universo acelerado ha cogido desprevenidos a astrónomos y físicos, quienes andan en plena efervescencia de especulaciones científicas para explicarlo. La imaginación humana es capaz de idear muchas teorías, y bien ingeniosas, pero sólo perdurarán aquellas que expliquen todas las observaciones. La observación astronómica sigue siendo la «piedra de toque» de cualquier teoría, y por elegante que ésta sea habrá de ser validada por las observaciones. Por ello, los científicos parecen lentos y conservadores, moviéndose con pies de plomo a la hora de cambiar las teorías consolidadas y los paradigmas.

Una forma inmediata de interpretar la expansión acelerada sería considerar que la gravedad no sigue la misma ley en nuestro entorno cercano que a escalas supergalácticas, y que a tales distancias no puede frenar la expansión puesto que su poder atractivo no se prolonga indefinidamente en la distancia. Otra propuesta, ya formulada, sería que la aceleración observada es una apariencia causada por el tiempo mismo que va gradualmente enlenteciéndose. Pero los cosmólogos prefieren mantener la universalidad de las leyes físicas establecidas en el planeta Tierra y sus alrededores, y se han lanzado a postular la existencia de una especie de fluido cósmico de propiedades contradictorias que lo llena todo y que se manifiesta como una energía desconocida —bautizada como energía oscura— que en vez de atraer repele, tan poderosa que vence muy eficazmente a la atracción gravitatoria de las enormes masas de los cúmulos y supercúmulos de galaxias.



Figura 3. El Very Small Array –IAC y las universidades de Cambridge y Manchester– es uno de los instrumentos instalados en el Observatorio del Teide del Instituto de Astrofísica de Canarias para medir anisotropías en el Fondo Cósmico de Microondas. En este observatorio se mide sistemáticamente desde hace más de veinte años esta radiación primigenia con diferentes instrumentos y técnicas. (Créditos: IAC)

Por el momento, las observaciones disponibles están a favor de esta energía oscura. Las primeras fueron, como anteriormente señalamos, las hechas mediante fotometría de las supernovas tipo Ia, y mostraron que las galaxias más viejas se están expandiendo a un ritmo más lento que el actual. Pero también las medidas de la radiación del Fondo Cósmico de Microondas —o radiación de fondo— apuntan en esta dirección.

Recordemos que fueron Penzias y Wilson quienes, en 1965, descubrieron esta radiación, este ruido de fondo que lo llena todo, y su descubrimiento sirvió para afianzar los modelos de Gran Explosión. Muy posteriormente se lograron detectar anisotropías en el Fondo Cósmico de Microondas, que aun siendo pequeñísimas —del orden de 0,00001%—, están llenas de información sobre los orígenes de la estructura del edificio gigantesco del Cosmos que vemos. Pues bien, parece requerirse la contribución de la energía oscura para completar la densidad del Universo obtenida a través de las medidas del Fondo Cósmico de Microondas. Resulta que, puesto que los tamaños de las irregularidades en la radiación de fondo son un reflejo de la geometría global del espacio, sirven para cuantificar la densidad del Universo, y esta densidad es netamente mayor que la simple suma de la materia ordinaria y la exótica. Pero además, las modificaciones causadas en esta radiación por los campos gravitatorios de las grandes estructuras cósmicas dependen de cómo ha cambiado el ritmo de expansión. Y este ritmo concuerda con las predicciones de los modelos de energía oscura.

La distribución de los enjambres de galaxias muestran ciertos patrones, concordantes con las «manchas» observadas en la radiación de fondo, que sirven para estimar la masa total del Universo (figura 3). Pues también estos modelos requieren de la energía oscura. Y los estudios de la distribución de las lentes gravitatorias —los objetos muy masivos, recordemos, se comportan como lentes curvando las trayectorias luminosas— parecen necesitar de la energía oscura para explicar el crecimiento en el tiempo de las aglomeraciones de materia. Pero no todo son confirmaciones, hay observaciones que no pueden explicar estos modelos, como por ejemplo las abundancias de los cúmulos de galaxias más lejanos.

Son muchos los investigadores que están tratando de encontrar en la energía oscura la causa de las cosas no explicadas en sus modelos previos. Los datos se van acumulando y los modelos son cada vez más refinados. No hay duda de que se irán añadiendo más indicios y hasta pruebas, tal es la fiebre causada en los científicos por esta sorprendente aceleración del Universo.

La omnipresencia de la energía oscura es tan sutil que, aun llenándolo todo nos ha pasado desapercibida, porque está muy diluida y porque no se acumula formando «grumos», como la materia. Para que sus efectos sean apreciables se necesitan espacios y tiempos muy grandes, pese a ser la energía más poderosa del Cosmos. Permítanme que

añada que en esta energía, que actúa como una fuerza repulsiva, lo que la hace tener presión negativa, caben dos posibilidades: la llamada «energía fantasma» y la llamada «quintaesencia». Todo ello muy sugerente, pero difícil de digerir científicamente hablando, ya que se trata de fuerzas que no entendemos y no podemos observar.

Resulta absolutamente lógico pensar, que si tal energía representa más de las tres cuartas partes de nuestro Universo, ha tenido que influir y mucho en todo su proceso evolutivo, determinando su estructura a gran escala y la formación de los cúmulos de galaxias. Hasta la evolución de las propias galaxias debe estar marcada por su omnipresencia. La formación de las galaxias y su agrupación en cúmulos sabemos que está determinada por las interacciones, choques y fusiones entre ellas —nuestra propia Vía Láctea se piensa que es el resultado de la coalescencia de quizá un millón de galaxias enanas— por lo que la energía oscura ha tenido que jugar un papel nada despreciable en todo ello. No obstante, la confirmación clara vendrá cuando seamos capaces de determinar si el comienzo del predominio de la expansión acelerada coincide en el tiempo con el final de la formación de las grandes galaxias y de los supercúmulos.

Universo en cuatro dimensiones

Le he dado muchas vueltas a cómo mostrar lo que sabemos hoy sobre la estructura del Universo al que pertenecemos. No resulta nada fácil por múltiples razones, y no tan sólo porque no sea sencillo sintetizar para los no especialistas, sin dejar cabos sueltos importantes que solemos dar por sobrentendidos.

Si consideramos como Universo todo lo que existe, desde las entidades mínimas a las más gigantescas, una forma de mostrar su estructura sería hacer un inventario de todos estos elementos y situarlos jerárquicamente en el espacio. Pero quedaría incompleto sin decir cuáles son sus interconexiones e interrelaciones. Además, todo ello —elementos e interconexiones— no son algo estático, y todo el conjunto está interaccionando y modificándose permanentemente. Démonos cuenta de que, asimismo, no podemos tener una «instantánea» de lo que hay en el Universo en este momento, pues cuando observamos con un telescopio en una dirección, nuestra mirada, al ir penetrando más y más profundamente, va retrocediendo más y más en el tiempo: obtenemos una cuña de la historia del Universo, no una instantánea. Sin embargo, puesto que todas las direcciones del Universo resultan estadísticamente idénticas, lo que vemos en cualquier dirección a una distancia de miles de millones de años luz debe ser una representación de nuestra propia región del espacio, y de cualquier otra, tal y como fueron hace miles de millones de años.

Iremos por etapas. Primero recordaremos que, de acuerdo con cuanto venimos diciendo, más de las tres cuartas partes de nuestro Cosmos, ahora, es una forma de energía misteriosa que llamamos energía oscura, y del resto, más

del 85% es materia oscura, que no podemos ver porque aunque interacciona gravitatoriamente, no lo hace con la radiación. O sea, que no mucho más del 3% de todo el Universo es materia ordinaria, de la que sólo acertamos a visualizar una pequeña parte de ella concentrada en estrellas y galaxias. Recordemos que llamamos materia ordinaria a la materia bariónica —protones, neutrones, etc.— de la que nosotros estamos hechos. Y esta materia la encontramos, en su mayor parte, en forma de plasma gaseoso ionizado, estando en forma sólida y líquida sólo una muy mínima parte de la misma. ¡Qué difícil es pensar que los inmensos océanos y el suelo firme de la corteza terrestre, que tanta seguridad nos da al pisarlo, son algo verdaderamente rarísimo en el Universo! Pero la ciencia nos ha llevado a la aceptación de que vivimos en un lugar bien exótico, situado en un rincón cualquiera del Cosmos.

El panorama, por otra parte, no puede dejar de ser más descorazonador: ¡no tenemos ni la más remota idea, pese a nuestras elegantes especulaciones científicas, de la naturaleza de un 97% de los constituyentes de nuestro Universo! Claro que saber esto, ya es un gran triunfo de la gran aventura humana en pos del conocer.

Por nuestra propia naturaleza, nos movemos y entendemos en tres dimensiones espaciales, más el tiempo. Y en este espacio-tiempo están desarrollados los modelos relativistas al uso. Por eso, voy a describir la estructura del Universo en cuatro dimensiones. Antes, no puedo dejar de reseñar los modelos de «multiversos», derivados de la teoría de supercuerdas, elegantes especulaciones físico-matemáticas de universos múltiples, en los que nuestro Universo tridimensional sería una proyección más de tres dimensiones, instalada en un espacio global de nueve.

A continuación intentaré hacer una descripción asequible de cómo imaginamos los astrónomos hoy el Universo, en el momento actual de su historia. Después, me detendré en alguna de las etapas más significativas de su evolución.

El Universo a gran escala se nos presenta hoy ante nuestros telescopios, con su poco más de 13.000 millones de años de vida, enormemente vacío. La materia aparece muy concentrada y jerarquizada gravitatoriamente en estrellas, con sus sistemas planetarios, en galaxias, en cúmulos de galaxias y en supercúmulos de galaxias (figura 4). Los enormes vacíos —planetarios, interestelares e intergalácticos— están llenos de materia muy diluida, pero que sumada representa la mayor parte de la materia ordinaria. La materia oscura también se acumula y ordena de manera análoga, al estar regida por la gravedad. Mientras, por el contrario, la energía oscura se reparte uniformemente por todos sitios.

Si fuésemos haciendo zoom, y acercándonos a cada rincón de nuestra propia galaxia —la Vía Láctea— nos encontraríamos con brillantes sistemas planetarios de uno o varios soles, con sus planetas, satélites, cometas y miríadas de cuerpos menores orbitando unos en torno a otros, y todos alrededor de sus respectivos centros de

Página anterior:

Figura 4. Galaxia conocida como Triángulo o M33, obtenida con el INT del Observatorio del Roque de los Muchachos del Instituto de Astrofísica de Canarias. En esta extraordinaria imagen de la menor de las tres galaxias espirales que conforman nuestro Grupo Local –compuesto además por Andrómeda, la Vía Láctea y unas cuantas más de menor tamaño– se pueden apreciar un sinnúmero de sus componentes: desde diversas clases de nubes interestelares, hasta estrellas en todas sus fases evolutivas, bellas nebulosas planetarias y remanentes de supernovas. (Créditos: IAC)

masas. Y como en cada galaxia puede haber cientos de miles de millones de ellos, algunos estarán naciendo en el seno de nubes de polvo y gas interestelares, entre convulsiones y reajustes, mientras otros estarían en sus etapas finales, implosionando y explotando, expulsando materia incandescente, partículas y radiación en un espectáculo dantesco y bellissimo. Mientras, la mayoría de los objetos galácticos los encontraremos en las etapas intermedias de sus respectivas peripecias vitales. La descripción de la vida y milagros de la multifacética y variopinta «fauna» galáctica nos ocuparía demasiadas páginas, llenas, eso sí, de colorido, belleza y drama. Otra cuestión, que sí nos importa y mucho, es la de la existencia de vida más allá de nuestro planeta. De ser la vida algo extendido en el Universo, tendría que estar influyendo, aunque no sepamos cómo aún, en su estructura. Por esta vía podrían venir reajustes conceptuales de nuestra cosmovisión aún mayores de los que se avecinan como consecuencia del Universo acelerado.

Los enormes enjambres de estrellas, gas, polvo y mucha materia oscura que son las galaxias no están aislados en el espacio, por el contrario los observamos fuertemente ligados entre sí por gravedad. Y se acoplan formando agrupaciones, cúmulos de galaxias, que a su vez se asocian en supercúmulos. Y estas desmesuradas acumulaciones de materia se nos presentan organizadas en mallas similares a una telaraña, con direcciones filamentosas privilegiadas de decenas de millones de años luz. Todo ello flotando en vacíos enormes.

No debemos olvidar que toda esta enormidad está en plena actividad y que todos los objetos celestes se están moviendo con velocidades alucinantes. Imaginar, por ello, un Universo mecánicamente regulado al modo de un reloj perfecto, es lo más contrario a la realidad. Las interacciones son múltiples y los choques frecuentes. Estos choques, ya sean entre las capas externas estelares y el medio circundante, ya sea entre nubes y supernubes interestelares o entre galaxias, resultan ser los mecanismos más eficaces para cincelar las galaxias y movilizar los entornos cósmicos (figura 1). La energía parece derrocharse en fenómenos violentísimos que observamos por doquier y que producen nuevos objetos celestes.

Embebida en toda esta superestructura, además, está la energía oscura contrarrestando con eficacia a la gravedad y expandiendo el espacio aceleradamente, generando sin duda acciones directas o indirectas en todos los escalones de la estructura cósmica. El que aún no las conozcamos, no quiere decir que no estén produciéndose.

Podemos quedarnos con la imagen simplificada de un Universo gigantesco, violento, en expansión acelerada, con la materia —la ordinaria de la que nosotros mismos estamos hechos, y la oscura— concentrada en islas plenas de acción empujada por la gravedad, empapada toda esta plétora por la energía oscura, y bañada en radiación electromagnética. Y en un rinconcito, nuestra pequeñísima Tierra, llena de vida, danzando en el espacio.

Después de este visionado semi-cinematográfico de cómo entendemos que debe ser la estructura actual del Universo, hay que decir algo de las etapas principales de su vida. Porque lo que ahora contemplamos, incluida la vida que bulle en el planeta Tierra, es consecuencia de su evolución general, determinada por unas leyes que tratamos de ir descubriendo. Precisamente conocer el nacimiento y evolución de todas y cada una de las partes del Cosmos es lo que subyace actualmente en toda investigación astronómica.

Evolución del Universo

Mucho se ha escrito sobre la flecha del tiempo, tratando de descubrir en qué dirección camina la evolución de nuestro Universo y, puesto que tuvo un principio, conocer cuál será su final.

Desde que el Universo dejó de ser inmutable, a principios del pasado siglo, queremos conocer su historia y, sobre todo, su evolución, pues en ella está la clave del origen de nuestra propia historia y de la presencia de vida inteligente en otros planetas de otros sistemas estelares. Pero una historia es un relato de acontecimientos en el tiempo, y por lo que parece, el tiempo, nuestro tiempo, empezó con el propio Universo al que pertenecemos y aún no sabemos a ciencia cierta cuál es la esencia real de este parámetro físico. Sin entrar en disquisiciones profundas, consideraré el tiempo como lo imaginamos de manera intuitiva: un continuo uniforme que se extiende desde la Gran Explosión hacia un futuro lejano.

La casi totalidad de la información que nos llega del mundo exterior está en forma de radiación electromagnética, y la primera instantánea retrospectiva del Universo nos la proporciona el Fondo Cósmico de Microondas. Para entonces, el Universo tenía unos 400.000 años, y ya antes le habían sucedido muchas cosas de gran trascendencia. Lo que pasó antes lo inferimos de los modelos cosmogónicos, el más aceptado de los cuales sigue siendo el llamado Modelo Estándar. No olvidemos que este modelo describe lo que sucedió después de la Gran Explosión, pero no aporta información sobre la singularidad en sí misma. Recordemos también que el modelo se desarrolló antes del descubrimiento de la expansión acelerada, y que los tres pilares sobre los que se sustenta son: la expansión decelerada, el Fondo Cósmico de Microondas y la nucleogénesis primordial, que produjo los primeros elementos ligeros que siguen dominando la materia. Su clave es que el Universo comenzó siendo muy caliente y muy denso, para al expandirse irse diluyendo y enfriando.

Para explicar la naturaleza y el nacimiento de la materia y sus interacciones, se siguen produciendo abundantes teorías y modelos muy especulativos, y de una complejidad sólo asequible a quienes a esto se dedican. Sus fundamentos empíricos, no obstante, son observaciones astronómicas y experimentos con los grandes aceleradores de partículas, que resultan aún insuficientes para poner luz entre tanta especulación físico-matemática. Digo todo esto para evi-

tar que se den por científicamente probadas la mayoría de las cosas desconcertantes que se afirman, incluidas las que voy a decir, sobre los primeros instantes del Universo.

Inmediatamente después de que todo empezase en la Gran Explosión, pasados tan sólo los primeros 10^{-35} segundos, cuando todas las fuerzas fundamentales estaban unificadas aún, el espacio sufrió una expansión exponencial prodigiosa —creció en un factor 10^{26} , en tan sólo 10^{-33} segundos—, según postulan los modelos inflacionarios, amparados en datos de la radiación de fondo. Tal expansión acelerada diluyó todo lo preexistente, suavizando las posibles variaciones en su densidad. Y aquí nos encontramos ya con la primera expansión acelerada, que supone algo tan insólito como que la densidad de energía debe ser positiva y mantenerse casi constante —este casi es muy importante— mientras su presión es negativa (figura 5). Y acaba con una brusca caída de la densidad. Obviamente, no sabemos cómo y por qué arranca y termina la inflación.

Durante el periodo inflacionario, la densidad de energía del espacio fluctúa mínimamente, debido a la naturaleza estadística de las leyes cuánticas que rigen a escalas subatómicas. Pero estas homogeneidades son agrandadas exponencialmente por la inflación, dando lugar a anisotropías en el Fondo Cósmico de Microondas, y son las semillas que marcan el devenir grandioso del Universo, son los embriones de las macroestructuras de galaxias y cúmulos de galaxias que hoy vemos. Sale el Universo de este periodo recalentado, y la energía potencial del vacío convertida en partículas calientes.

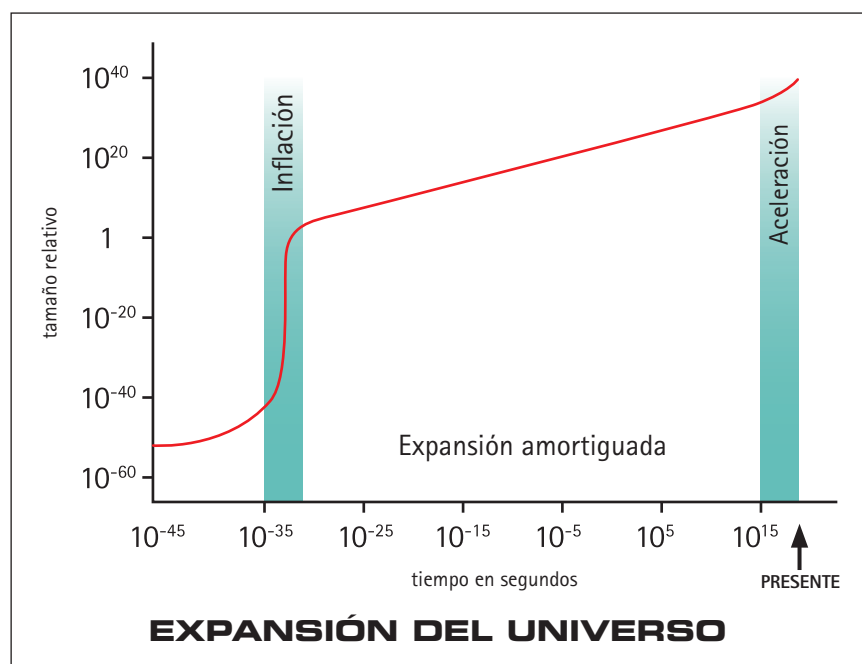


Figura 5. Aunque no es posible representar con realismo la expansión del espacio y mucho menos su extraordinaria «inflación», para formarnos una primera idea —aunque simplificada— de la expansión del Universo en función del tiempo, hemos dibujado esta gráfica. Se ha hecho en escalas logarítmicas para hacer visibles los detalles. Tanto «inflación» como «expansión acelerada» tienen en común una presión negativa que se contrapone a la atracción gravitatoria. La naturaleza de estos fenómenos nos es desconocida por el momento. (Créditos: IAC)

Siguiendo esta descripción sintética de la evolución del Universo que estoy haciendo de acuerdo con los modelos más aceptados, las diferentes partículas y antipartículas, junto con sus interacciones, van creándose al ritmo que la expansión y consiguiente enfriamiento del Universo lo van permitiendo. A solo 10^{-5} segundos ya hay bariones. Este «potaje» de partículas en continuo nacimiento y desaparición, siguió enfriándose y casi todas las partículas de materia y antimateria se aniquilaron entre sí. Pero, por razones que se desconocen, quedó un ligero exceso de bariones que no hallaron partículas de antimateria para aniquilarse y, por consiguiente, sobrevivieron a esta extinción.

Cuando la temperatura cayó a unos 3.000 grados, los protones y los electrones pudieron combinarse y formaron átomos, eléctricamente neutros, de hidrógeno. Se desacopla así la materia de la radiación, al dejar los fotones de interactuar con la materia de forma tan intensa, y la luz se desparrama por doquier. Estos fotones primigenios son los que constituyen la radiación de fondo de microondas. Para entonces el Universo tenía ya 400.000 años, y le habían pasado, como hemos visto, cosas muy importantes. Una de ellas fue la nucleosíntesis primordial, que determinó la preponderancia absoluta del hidrógeno y el helio en el Universo. Tal proceso, gobernado por la expansión, sólo pudo darse justo durante unos pocos minutos, por ello esta nucleosíntesis no pasó de los elementos más ligeros.

A continuación se abre una época gris, la que va de la liberación de la radiación de fondo de microondas al resurgimiento de la luz, con el nacimiento de las primeras galaxias y estrellas. Esta etapa del Universo nos es muy desconocida porque no hay radiaciones que observar, sin embargo resulta decisiva, pues en ella la gravedad se dedicó a ir ensamblando los objetos que hoy pueblan el Cosmos. Ese periodo concluye en los primeros millones de años, cuando la luz de las estrellas brotó en cantidad suficiente como para ionizar, con su radiación ultravioleta, el gas que ahora domina el espacio intergaláctico. Tales estrellas fueron muy peculiares: astros supermasivos, de cien masas solares o más y compuestos sólo de hidrógeno y helio. Todo esto está corroborado por los espectros observados de los cuásares, las galaxias y por las explosiones de rayos gamma más remotas, además de por el hallazgo de galaxias lejanas, a menos de mil millones de años de la Gran Explosión.

Se cree que una galaxia, o una estrella, empiezan a formarse cuando una región del espacio con mayor densidad que su entorno comienza a contraerse sobre sí misma, por efecto de su propia gravedad. Las galaxias, no se olvide, están formadas sobre todo por materia oscura que se nos escapa a la observación directa. Aunque la región esté sometida a la expansión global, el exceso de materia termina provocando su colapso, y así se crea un objeto ligado, ya sea una estrella, un cúmulo estelar o una galaxia. Son muchos, naturalmente, los añadidos y matices que son precisos para explicar lo que

sabemos al respecto, que ya es bastante, y abundantísimas son las investigaciones en curso sobre el origen y evolución de estrellas y galaxias. Sólo quería indicar cuál es el mecanismo básico de generación de la mayoría de los objetos que observamos.

Todo indica que, durante los primeros miles de millones de años del Universo, se produjeron frecuentes choques de galaxias, gigantescos brotes de formación estelar dentro de las mismas, y se generaron agujeros negros de más de miles de millones de masas solares. Fue una época extraordinariamente energética y agitada. Esta desahogada actividad parece estar ahora en declive, quizá como consecuencia de la aceleración en la expansión. En el Universo cercano sólo vemos tales prodigios de actividad en pequeñas galaxias, las grandes, tipo la Vía Láctea o Andrómeda, más reposadas, parecen haber entrado en etapa de madurez.

Aún no se puede precisar cuándo empezó a ser dominante la aceleración sobre la deceleración, aunque se ha apuntado que debió ser cuando el Universo tenía unos ocho mil millones de años. Anteriormente ya dijimos algo de lo que se especula sobre los efectos de la energía oscura. Sin duda, confirmada la realidad de las dos energías en competencia —la gravitatoria tratando de juntar la materia, y

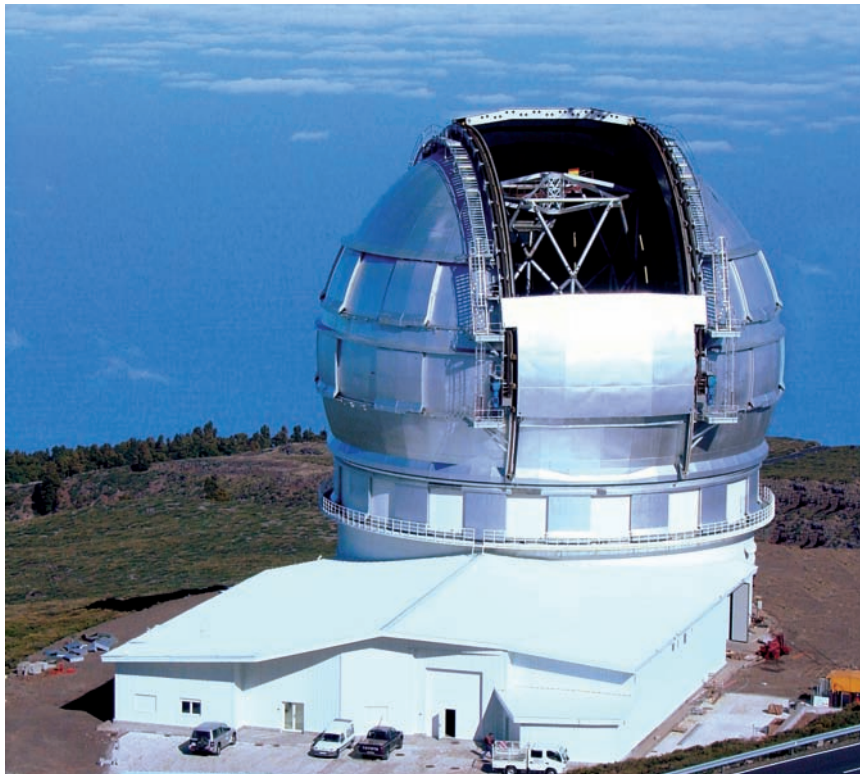


Figura 6. Vista exterior del Gran Telescopio CANARIAS –GTC–, situado en el Observatorio del Roque de los Muchachos del Instituto de Astrofísica de Canarias. Es el mayor y más avanzado telescopio óptico-infrarrojo del mundo, con un espejo primario segmentado de 10,4 metros de diámetro. La baja nubosidad de este Observatorio —las nubes que se ven están por debajo, aunque no lo parezca por la perspectiva de la imagen— junto con la transparencia y estabilidad de su atmósfera, hacen de este sitio uno de los escasísimos lugares del planeta aptos para instalar los más avanzados telescopios. El GTC, con su gran objetivo, su excelente óptica y su potente instrumentación focal, más la extraordinaria calidad astronómica del cielo de La Palma, constituye una poderosísima herramienta para penetrar en los secretos del Universo. (Créditos: IAC)

la energía oscura tratado de separarla—, tienen que producirse modelos que expliquen todo lo que observamos. Para tener confianza en ellos, habrá que esperar a que los nuevos telescopios en tierra y en el espacio empiecen a producir datos significativos. En este sentido quiero decir que tenemos fuertes esperanzas puestas en el gran telescopio Canarias, que estará plenamente operativo en 2009 (figura 6). Los telescopios son las únicas máquinas del tiempo y cuanto mayores sean sus espejos, más profundamente penetran sus observaciones en el Cosmos y más retrocede lo que vemos en el tiempo. Con ellos pretendemos observar el nacimiento y la evolución de los objetos más primitivos.

Por lo mucho que nos toca, señalaremos que nuestro Sol y su Sistema Solar nacieron, cuando el Universo debería andar por los nueve mil millones de años, de una nube de material reciclado producido en el interior de estrellas precedentes que lo fueron arrojando al medio interestelar. Los elementos químicos de las moléculas orgánicas, que en nuestro planeta sustentan toda forma de vida, no se han podido crear *in situ*, necesariamente estaban ya en el disco protoplanetario, lo que nos permite decir con certeza que «somos polvo de estrellas». Lo cual va mucho más allá de una bella frase poética.

Hasta hace nada, el futuro del Universo se predecía en base a la energía gravitatoria y a la termodinámica, en función de la cantidad de materia que contuviese. Si la masa estaba por encima del valor crítico calculado de acuerdo con los modelos al uso, se vaticinaba que iría frenándose la expansión hasta colapsar en una nueva singularidad y rebotar en un proceso oscilante de Grandes Explosiones y sus consiguientes colapsos. De lo contrario, se iría expandiendo indefinidamente. En estos momentos hay que contar con la aceleración del Universo, y ello nos lleva a imaginar un futuro diferente.

Final

De continuar la expansión acelerada, las galaxias, empezando por las más lejanas, habrán ido desapareciendo de nuestra vista detrás del horizonte de sucesos. Dentro de unos miles de millones de años las galaxias cercanas se habrán fusionado formando un conjunto de estrellas gigantesco ligado por gravedad, una mega súper galaxia —mesuga— envuelta en un espacio oscuro y vacío. La radiación de fondo de microondas estará tan diluida que será indetectable. Mucho antes de que todo se enfríe y se acabe, quedaremos aislados en el espacio y nuestro Universo asequible será sólo nuestra propia mesuga.

Desolador final de nuestro mundo físico. Pero ¿es realmente el final? ¿Cómo evolucionarán internamente las miríadas de millones de mesugas al quedar aisladas? ¿Habrá algún mecanismo que las conecte de alguna forma, pese a que la separación entre ellas siga aumentando aceleradamente?

Está visto que ¡nunca perdemos la esperanza, ni nuestro afán de eternidad! Así somos. Estamos, además, determinados para ser curiosos, tenemos el instinto del saber.

En los *sapiens-sapiens* parece ser un impulso tan básico como el de reproducirse. ¿Tendrá esto algo que ver con la expansión acelerada de nuestro Universo?

Tal y como están las cosas de momento, parece que ha hecho falta la existencia conjunta de las energías antagónicas, gravitatoria y oscura, para que se formase el Universo, y dentro de él nuestro Sol y nuestra Tierra, y que tras laboriosos procesos evolutivos previos, nuestros padres pudiesen engendrarnos. Habría bastado con que la energía oscura fuese un poco más débil o un poco más poderosa para que no hubiésemos existido.

Tanto si descendemos a las minimeces de las últimas partículas subnucleares, como si nos perdemos en las inmensidades del Cosmos, todo lo encontramos pleno de actividad, movido por fuerzas poderosas. Lo mismo podemos decir de la vida en todas sus facetas, ya se manifieste en organismos unicelulares o en bosques impenetrables, también aquí la actividad es incesante. Debe ser algo consustancial con nuestro Universo: nada es estático, todo es acción y evolución. La energía abunda y parece derrocharse: en las galaxias y en las estrellas son frecuentes los episodios cataclísmicos, de una potencia desmesurada. Toda

esta agitación, frecuentemente catastrófica, es la manifestación de lo que podríamos denominar «ímpetu cósmico», que lo llena todo y lo empuja todo. Este «ímpetu» se expresa como energías, que en un intento sistematizador hasta se pondrían catalogar en dos grandes grupos: las energías físicas y las energías vitales. En algún momento habrá que conceptualizar todo esto y darle formalismo matemático.

Quienes hayan disfrutado de noches estrelladas en plena naturaleza, lejos de la polución y el bullicio de las ciudades, y se hayan dejado llevar por las sensaciones, los sentimientos y la imaginación, en ese estado de gracia, habrán sentido la fuerza profunda de las preguntas fundamentales. Aunque ninguna de ellas haya sido respondida en lo escrito anteriormente, si han leído atentamente habrán sentido brillar la chispa de la inteligencia humana enfrentándose con éxito a la desmesura del Universo y a sus atractivos misterios. La verdad es que, aunque nuestro desconocimiento tienda a infinito, lo ya conocido es mucho y supone un triunfo notable que dignifica a toda la humanidad. Mientras esta especie increíble, malvada y cerril, a la par que amorosa e inteligente, siga existiendo, continuará mirando e interrogando al cielo.

Bibliografía

- Adams, F. C. y G. Laughlin. *The five ages of the universe: inside the physics of eternity*. Free Press, 2000.
- Caldwell, R. R. «Dark energy». *Physics World*, 1.17 / 5 (2004): 37-42.
- , M. Hamionkowski y N. N. Weinberg. «The phantom energy and cosmic doomsday». *Physical Review Letters*, 91 (2003) 071301.
- Dine, M. y A. Kusenko. «Origin of the matter antimatter asymmetry». *Reviews of Modern Physics*, 76 (2004): 1-30.
- Freedman, W. L. y M. Turner, Michael. «Measuring and understanding the universe». *Reviews of Modern Physics*, 75 (2003): 1.433-1.447.
- Harrison, E. R. *Cosmology: the science of the universe*. Cambridge University Press, 2000.
- Hertzberg, M., R. Tegmark, M. Shamit Kachru, J. Shelton y O. Ozcan. «Searching for inflation in simple string theory models: an astrophysical perspective». *Physical Review*, 76 / 103521 (2007): 37-45.
- Kirshner, R. P. *The extravagant universe: exploding stars, dark energy, and accelerating cosmos*. Princeton University Press, 2004.
- Krauss, L. y G. Starkman. «Life, the universe and nothing: life and death in an everexpanding universe». *Astrophysical Journal*, 531 / 22 (2000): 22-30.
- Peebles, P. J. E. y B. Ratra. «The cosmological constant and dark energy». *Reviews of Modern Physics*, 75 (2003): 559-606.
- Primack, J. y N. E. Abrams. *The View from the Centre of the Universe: Discovering Our Extraordinary Place in the Cosmos*. Riverhead, 2006.
- Silk, J. *The infinite cosmos: questions from the frontiers of cosmology*. Oxford University Press, 2006.
- Srianand, T. A., P. Petitjean y C. Ledoux. «The cosmic microwave background radiation temperature at a redshift of 2.34». *Nature*, 408 / 6815 (2000): 931-935.
- Wilson, G. *et al.* «Star formation history since $z = 1$ as inferred from rest-frame ultraviolet luminosity density evolution». *Astronomical Journal*, 124 (2002): 1.258-1.265.