



# Un universo inverosímil

Vladimir Ávila-Reese

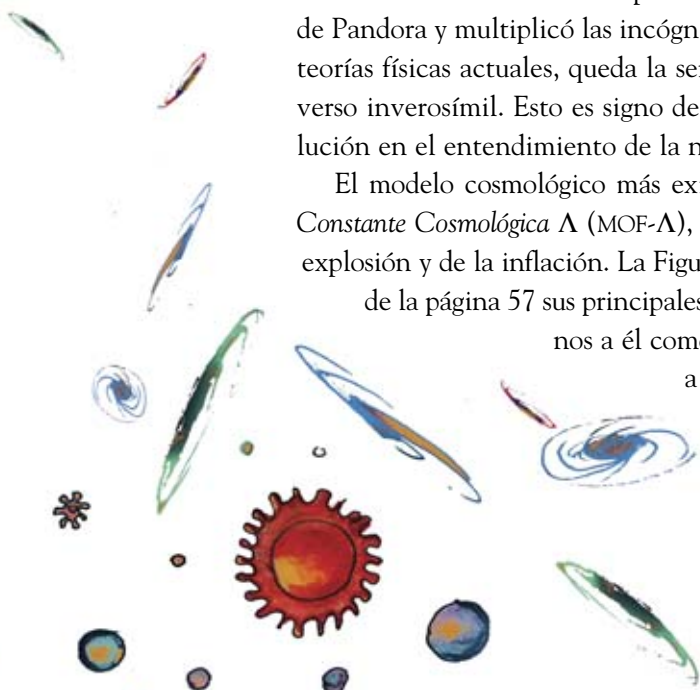
La cosmología es quizá una de las ramas de la ciencia más asombrosa: conceptos como la gran explosión, la inflación y la expansión del universo, o la existencia de materia y energía oscuras, son ideas que exigen ampliar los límites de nuestra capacidad de comprensión. Como aquí se expresa, sólo queda aceptar que, efectivamente, vivimos en un universo inverosímil.

La cosmología, ciencia que estudia la evolución del universo y de sus principales componentes, ha sufrido un vertiginoso avance en la última década, impulsada especialmente por las observaciones astronómicas.

La precisión con la que se conoce la mayoría de los parámetros cosmológicos es actualmente superior al 95 por ciento. Pero esta gran precisión, en vez de acercarnos a una comprensión final del universo, abrió más bien una caja de Pandora y multiplicó las incógnitas. Al describir el universo observable con las teorías físicas actuales, queda la sensación de que es algo muy extraño... un universo inverosímil. Esto es signo de que estamos en el umbral de una nueva revolución en el entendimiento de la naturaleza.

El modelo cosmológico más exitoso es el llamado de *Materia Oscura Fría con Constante Cosmológica  $\Lambda$*  (MOF- $\Lambda$ ), que se enmarca dentro de las teorías de la gran explosión y de la inflación. La Figura 1 resume sus principales etapas, y el recuadro de la página 57 sus principales propiedades. Por el momento, podemos referirnos a él como “modelo estándar” de la cosmología. Veremos

a lo largo de este artículo cómo se llegó y en qué se basa este modelo donde la materia conocida llega a ser sólo el 4 por ciento de todo lo que hay en el universo.



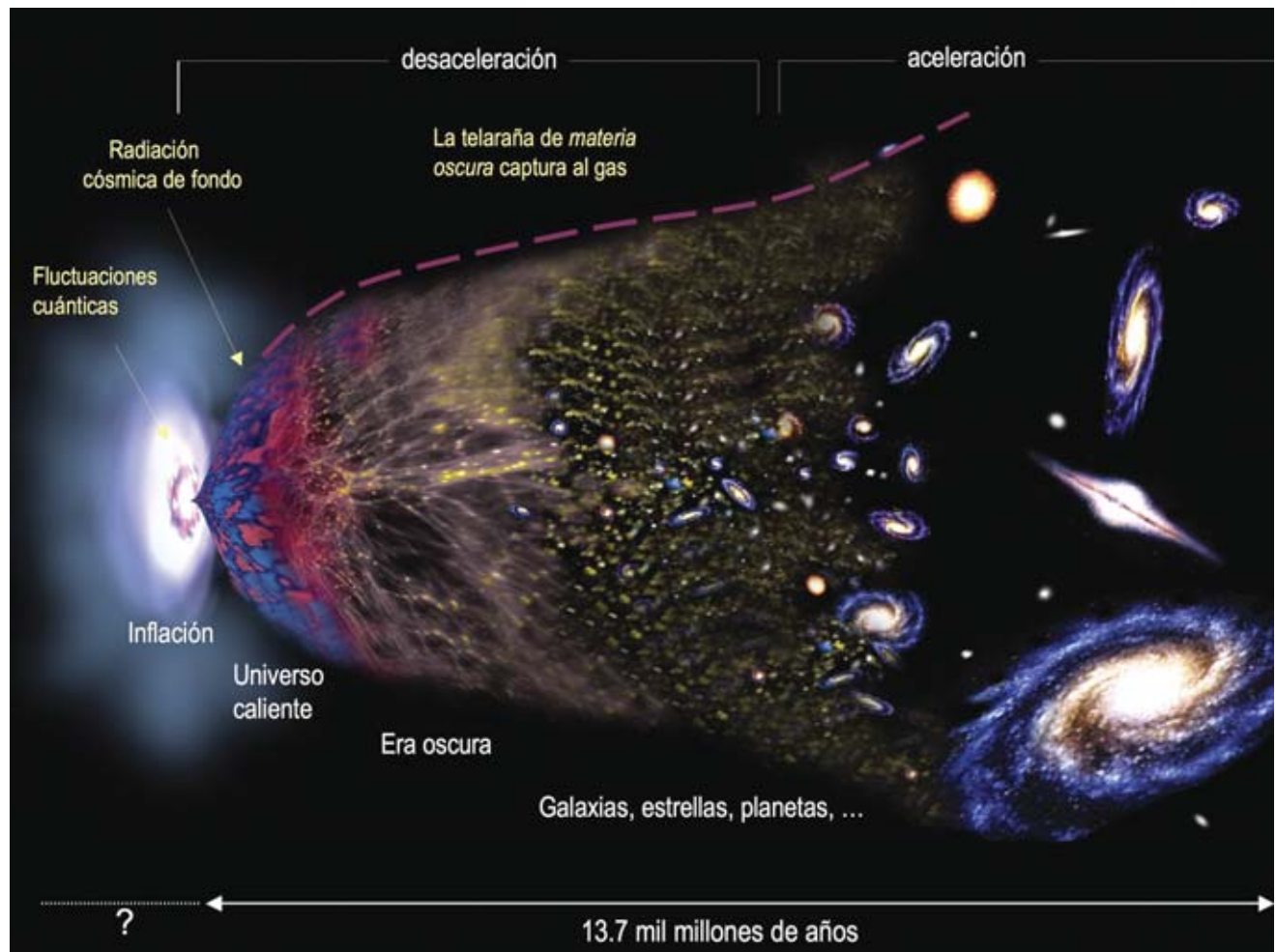


Figura 1. Principales etapas evolutivas del modelo cosmológico de *Materia Oscura Fría con Constante Cosmológica* (MOF- $\Lambda$ ).

### Un poco de historia

Hace apenas ochenta años, nuestra imagen astronómica del universo se reducía a un sistema conformado por cientos de millones de estrellas llamado Vía Láctea. Los estudios de medición de distancias del astrónomo estadounidense Edwin Hubble demostraron en 1924 que muchas de las nebulosas descubiertas en esa época son en realidad galaxias alejadas a grandes distancias, es decir, otras Vías Lácteas; algunas menores, otras mayores. Desde entonces se han descubierto cientos de miles de galaxias más.

El mismo Hubble emprendió la tarea de medir sus movimientos, y en el 1929 reportó otro gran descubrimiento: todas se están alejando unas de otras, y la velocidad con la que

se alejan es proporcional a la distancia que las separa. La ley que describe este alejamiento sugiere que no son las galaxias las que se están moviendo en el espacio, sino que es *todo* el espacio el que se está expandiendo de manera global y uniforme; éste —y por ende el universo— no son estáticos.

El descubrimiento de Hubble fue en realidad la confirmación observacional de un modelo basado en una teoría de la gravedad desarrollada años antes: la teoría general de la relatividad de Albert Einstein, que interpreta a la gravedad no como una fuerza, sino como la manifestación de la curvatura del espacio-tiempo. En la teoría de Einstein, dinámica y geometría se conjugan.

En 1917, Einstein aplicó su teoría al sistema físico más general: el universo: ¡vaya atrevimiento intelectual! Al notar que la solución a sus ecuaciones de campo implicaba un universo en movimiento, Einstein introdujo en ellas un factor conocido como *constante cosmológica*  $\Lambda$  que compensara el

## PRINCIPALES PROPIEDADES DEL “MODELO ESTÁNDAR” DE LA COSMOLOGÍA

La edad cósmica actual que las observaciones restringen para el modelo de *Materia Oscura Fría con Constante Cosmológica* (MOF- $\Lambda$ ) es de alrededor de 13 mil 700 millones de años. Las observaciones constriñen también una composición promedio en términos de densidad, tal que sólo aproximadamente un 4 por ciento consiste en materia ordinaria (llamada *bariónica*), 21 por ciento está en forma por *materia oscura exótica fría*, y 75 por ciento consiste en un medio repulsivo, la constante cosmológica  $\Lambda$ , o quizás algo más complejo, denominado genéricamente como *energía oscura*.

Mientras que las materias bariónica y oscura producen gravedad que frena la expansión del universo, la constante cosmológica  $\Lambda$  o la energía oscura son repulsivas y aceleran la expansión, hecho que además comenzó desde que la edad del universo era  $2/3$  de la actual.

En suma, todas las componentes producen una densidad igual a la crítica, lo cual implica una geometría de tipo plana o euclídea para el espacio. El modelo de materia oscura fría con constante cosmológica requiere además de un proceso de expansión inflacionario en el tiempo cósmico de alrededor de  $10^{-34}$  segundos, mismo que convierte las fluctuaciones cuánticas del vacío original en perturbaciones en densidad. Si éstas son de materia oscura fría, sobreviven a la época caliente del universo –algo que no pasa con las perturbaciones de materia bariónica pura–, crecen en amplitud y finalmente se colapsan gravitacionalmente, formando un tejido cósmico “oscuro” de halos, filamentos y paredes, capaz luego de atrapar al gas bariónico y propiciar así la incubación de las galaxias y estrellas en su seno (Figura 1).

efecto gravitatorio y mantuviese estático al universo (pues en aquella época, las observaciones astronómicas daban cuenta de un firmamento globalmente estático y, en general, el sentido común se inclinaba hacia un cosmos estacionario; Einstein no escapó esa vez al “sentido común”).

Más tarde, Aleksander Friedmann resolvió las ecuaciones de campo de Einstein sin introducir la constante  $\Lambda$  y predijo diferentes modelos de universo, todos cambiantes (véase Figura 2). Einstein se refirió a la constante cosmológica como “el peor error de su vida”... error que en realidad ahora, en un contexto algo diferente, ¡resulta ser un gran acierto!

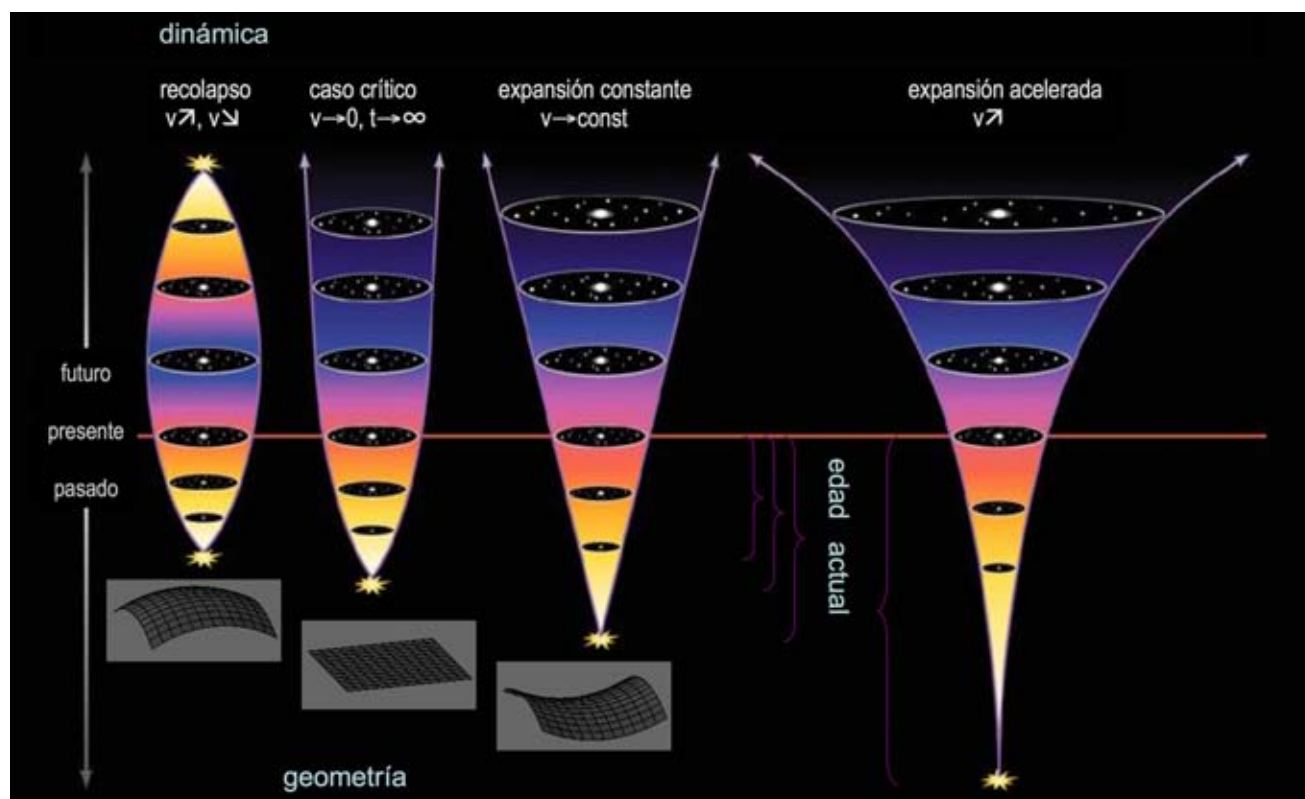
### La teoría de la gran explosión... sin explosión

El cambio constante del espacio implica que las condiciones físicas de la materia-energía cambian. Si hoy en día estamos expandiéndonos, entonces hacia el pasado las distancias eran más y más pequeñas; la misma cantidad de materia y energía que hoy ocupa un volumen dado, ocupaba volú-

menes cada vez más pequeños. Todo era más denso, más caliente.

Sin embargo, nunca hubo una explosión a partir de un “átomo primigenio”, como suele decirse en la literatura popular. Para que ocurra una explosión son necesarias fuertes diferencias de presión y temperatura. La base de la teoría de la gran explosión es la hipótesis de *homogeneidad e isotropía* en el universo temprano, es decir, que todo el universo presentaba la misma densidad, temperatura y presión en cualquier punto del espacio y en cualquier dirección (no hay centros, no hay ejes de rotación, no hay regiones privilegiadas). Por tanto, no se pudo haber dado una diferencia de presión o temperatura que produjese una explosión.

Además, al no tener el universo centros ni bordes, no hay un espacio “externo” hacia donde pueda expandirse la explosión, hacia donde



**Figura 2.** Diferentes casos de dinámica y geometría para el universo;  $v =$  es la tasa de cambio de distancias. En los tres primeros casos  $v$  decrece (la expansión se frena). En el primero, la expansión incluso se revierte, convirtiéndose en colapso, y la geometría tiene una *curvatura positiva* (universo cerrado). En el segundo,  $v$  tiende asintóticamente a 0, y la geometría es *plana* (universo crítico). En el tercero,  $v$  nunca se hace 0, y la geometría tiene una *curvatura negativa* (universo abierto). El parámetro clave entre uno y otro modelo es la densidad de materia del universo. Si ésta es mayor o menor que la del caso crítico, se tendrá el modelo cerrado o el abierto, respectivamente. En el cuarto modelo, además de materia existe un medio repulsivo dominante (energía oscura) tal que la expansión en vez de frenarse, se acelera. La geometría en este modelo dependerá de la densidad conjunta de la materia y el medio repulsivo.

se libere la energía. El nombre de “gran explosión” (*big bang*) fue acuñado en tono de burla por Fred Hoyle, que en su época (años cincuenta y sesenta) fue un detractor de esta teoría. Personalmente, yo preferiría el nombre de “teoría del universo evolutivo”, en contraposición al modelo de Hoyle, llamado de “estado estacionario”.

Veamos algunas de las fases importantes de la evolución del *universo caliente*. Cuando la edad del universo era de menos de una millonésima de segundo, todo era una sopa de parejas de partículas y antipartículas elementales que se aniquilaban entre sí, originando radiación gamma, misma que a su vez producía nuevamente las parejas.

A medida que el universo se expande, la radiación se enfría, y llega un momento en que ya no tiene la energía suficiente como para volver a producir las parejas de partículas-antipartículas. De esa época habría quedado sólo radiación (y posiblemente partículas exóticas de materia oscura), de no haber sido porque de cada aproximadamente mil millones de parejas, había una que no tenía su antipartícula. Gracias a esa ínfima asimetría bariónica (la materia común y corriente) es que estamos aquí.

Antes del primer segundo del universo, no podían existir todavía los *nucleones* (protones y neutrones) como tales: se transformaban unos en otros a través de reacciones débiles con los neutrinos. Pero debido a la expansión, la interacción de estos últimos dejó de ser significativa. El porcentaje de protones y neutrones quedó así congelado. En los siguientes cinco minutos, éstos formaron los núcleos atómicos de los elementos

más ligeros; básicamente, un 75 por ciento de hidrógeno y casi un 25 por ciento de helio en masa (posteriormente, la evolución estelar llega a alterar un poco estas fracciones: actualmente se mide en nuestra galaxia alrededor de 70.5 por ciento de hidrógeno, alrededor de un 28 por ciento de helio y aproximadamente un 1.5 por ciento de elementos más pesados. Esta *nucleosíntesis* de la gran explosión es crucial para explicar las abundancias observadas de hidrógeno y helio; parte del trabajo pionero de medición de las abundancias de elementos ligeros en el universo fueron realizados en México por Manuel Peimbert).

Pero en esas épocas tempranas del universo, la radiación era aún caliente; interactuaba con la materia y no permitía a los electrones ser capturados por los núcleos para formar átomos. Tuvieron que transcurrir alrededor de 380 mil años de expansión para que la radiación se hubiera enfriado hasta unos 4 mil grados centígrados y dejara de ser un obstáculo para el ensamblaje de los átomos.

El resplandor del fin de la era caliente del universo, llamada *recombinación*, es justamente esa radiación que inexorablemente sigue enfriándose con la expansión. En los años cuarenta, George Gamow predijo que el universo actual debía estar bañado por esa *radiación cósmica de fondo* uniforme, que podría observarse con detectores de microondas.

La radiación cósmica de fondo es el fósil más antiguo que tenemos del universo, y de hecho usted seguramente la ha detectado: el 2-3 por ciento de la estática que capta un televisor que no está sintonizando un canal es producida por ella.

La radiación cósmica de fondo se descubrió accidentalmente en el 1965, con una radioantena en microondas, y esto les valió el premio Nobel a los dos radiastrónomos involucrados en su detección. El espectro de la radiación cósmica de fondo, con temperatura pico de  $-270.27$  grados centígrados (2.73 kelvins, o grados absolutos de temperatura), es la de un “radiador perfecto”, lo cual evidencia que existía un equilibrio termodinámico (entre materia y radiación) cuando fue producida; además, muestra que el espacio se expandió desde entonces hasta ahora por un factor de 1080, mientras que la radiación se enfrió en esa misma proporción. Pero en esta radiación reliquia no sólo están impresas las propiedades físicas del universo caliente, sino también las semillas de la estructura cósmica actual.

En esas épocas (alrededor de  $1/36$  milésimo de la edad actual) la distribución de materia era todavía muy uniforme; la teoría de la gran explosión fue creada para describir ese

La radiación cósmica de fondo se descubrió accidentalmente en el 1965, con una radioantena en microondas, y esto les valió el premio Nobel a los dos radiastrónomos involucrados en su detección



caso. Las fluctuaciones en temperatura de la radiación cósmica de fondo, denominadas *anisotropías*, resultaron, cuando se pudieron al fin medir, ser lo suficientemente insignificantes como para no contradecir el postulado de homogeneidad de la teoría de la gran explosión, pero al fin y al cabo existen y son el punto de partida para explicar la compleja estructura del universo actual. La medición de las tenues anisotropías de la radiación cósmica de fondo, embriones de las estructuras cósmicas, mereció otro premio Nobel, que fue otorgado en el 2006 a los líderes del proyecto del satélite COBE, que realizó las mediciones en los años noventa.

### El universo homogéneo y la energía oscura

A excepción del nombre, la teoría de la gran explosión describe muy bien el *universo homogéneo* observado, y hace predicciones “tan demostrables como que la Tierra gira en torno al Sol”, parafraseando a Yakov Zel’dovich, uno de los gigantes de la cosmología moderna (ver recuadro adjunto).

Sin embargo, esta teoría tiene limitaciones que salen de su capacidad predictiva. La teoría de la inflación, surgida a principios de los años ochenta, intenta resolver dichas limitaciones remontándose a épocas tan tempranas como  $10^{-34}$  segundos y antes.

Pero ni siquiera la inflación responde la pregunta de si hubo o no un principio. A la edad del  $10^{-43}$  segundos, la era de Planck, el universo no puede ser descrito si no se cuenta con una teoría cuántica de la gravedad; es probable que el espacio y tiempo pierdan su naturaleza de continuidad en las condiciones extremas de la era de Planck.

Regresando a la gran explosión, el siguiente paso es identificar los parámetros claves del modelo y medirlos observacionalmente. Las ecuaciones relativistas que describen la dinámica del universo homogéneo se reducen a dos ecuaciones: una para la aceleración y otra

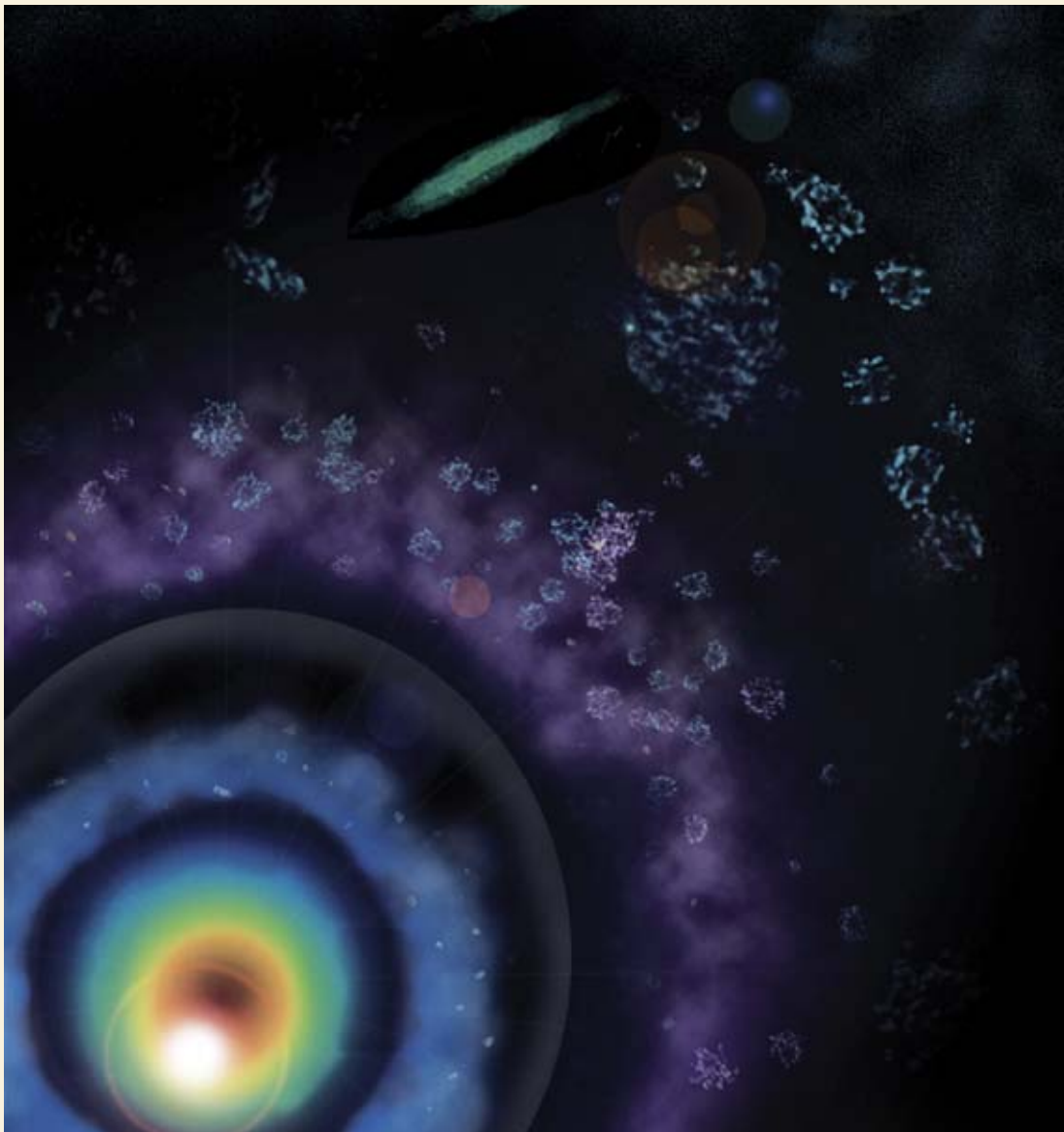
para la velocidad del parámetro de escala  $R$ . En el caso de la aceleración, la ecuación contiene un término gravitacional que tiende a frenar la expansión, (depende de las densidades de materia y radiación en el universo, y puede incluir también un término repulsivo que acelera la expansión depende de la densidad y la *ecuación de estado* de la así llamada *energía oscura*); además, ambos términos dependen también de la *tasa* de expansión. La velocidad, aparte de los parámetros mencionados, es influida por el parámetro de curvatura del espacio; pues según la relatividad general, dinámica y geometría están conectadas. Por tanto, para definir el tipo de universo en que vivimos, se requieren medir las densidades de materia, radiación y energía oscura (y su ecuación de estado), la tasa de expansión y la curvatura del espacio, o también medir el cambio de la tasa de expansión con el tiempo. Ninguna de estas mediciones es trivial ni directa, y además dependen unas de otras, de manera que los resultados suelen ser confusos.

Los sondeos observacionales que más han contribuido a determinar los parámetros cosmológicos “homogéneos”, curiosamente, se basan en el estudio de las propiedades y evolución de las estructuras cósmicas; es decir, justamente aquello que proviene de *las perturbaciones a la homogeneidad*. La excepción es el método basado en medición de distancias hacia el pasado que usa patrones lumínicos como las supernovas tipo Ia; en este caso, se infiere directamente la historia de expansión del universo. Con este método se mostró que la expansión, de estar frenándose, pasó a acelerarse hace aproximadamente  $1/3$  de la edad actual del universo. Este descubrimiento constituyó un parteaguas en la cosmología y la física en general. El autor, en colaboración con Claudio Firmani y otros colegas de Italia han introducido recientemente patrones lumínicos que permiten explorar la historia de expansión hasta épocas mucho más remotas que lo logrado con las supernovas. Estos patrones son los *estallidos de rayos gamma*, las explosiones más potentes del cosmos.

El descubrimiento de la expansión acelerada del universo implica que debe existir un *medio repulsivo* que empezó recientemente a dominar sobre la materia. Un medio es repulsivo cuando su ecuación de estado tiene *presión negativa*. Ésta es la propiedad que tiene la constante cosmológica  $\Lambda$  de Einstein y que se puede describir en el contexto de la física cuántica como el *vacío*, el estado de mínima energía que se da en ausencia de materia. Es una propiedad del espacio donde partículas virtuales aparecen y desaparecen en una escala temporal dada por el principio de incertidumbre de Heisenberg.

## PILARES OBSERVACIONALES DE LA TEORÍA DE LA GRAN EXPLOSIÓN

- 1) Los principales aciertos de esta teoría han sido predecir con detalle las siguientes observaciones:
  - 2) El corrimiento al rojo de las galaxias según la ley de Hubble, como debe ser si el espacio se está expandiendo uniformemente.
  - 3) Las abundancias cósmicas de los elementos ligeros; incluso algunas de ellas, como la del deuterio, son inexplicables de otra manera.
  - 4) La radiación cósmica de fondo en microondas, que baña uniformemente el cielo.
  - 5) La evolución del universo, que se ve ahora directamente impresa en las galaxias más alejadas, cuya radiación proviene del pasado remoto, y que muestran ser más jóvenes.



La inflación propone justamente al *vacío cuántico* como el estado inicial del universo. El vacío es inestable, y en su proceso de desintegración en partículas y campos reales actúa con su presión negativa, inflando desenfrenadamente al universo entre los  $10^{-35}$  y  $10^{-33}$  segundos de edad. La idea es que luego todo el vacío se transforma en materia-radiación caliente, y éstas, con su gravedad, comienzan a frenar la expansión, estado en el que debería seguir el universo.

Pero si por alguna misteriosa razón hubiera quedado un remanente de vacío, éste podría ser la *energía oscura*. La densidad de energía de la constante cosmológica (vacío) es inerte; es decir, que no cambia con la expansión del volumen, mientras que la densidad de la materia y radiación decrecen. Llega entonces un momento cuando la densidad de  $\Lambda$  supera a la de la materia y domina en la dinámica del universo, actuando con su fuerza repulsiva (véase Figura 3). El problema es que para explicar la densidad actual que se infiere para  $\Lambda$ , el remanente que quedó en la inflación tendría que haber sido alrededor de 120 órdenes de magnitud menor que la densidad de todas las otras formas de materia: algo demasiado “prefabricado”. Además con ese valor,  $\Lambda$  comienza a dominar en una época cercana a la nuestra, lo cual va en contra del principio copernicano.

A pesar de que las observaciones tienden a favorecer a  $\Lambda$ , los problemas teóricos mencionados han propiciado que la comunidad de cosmólogos busque alternativas. Entre ellas está la llamada “quintaesencia”: campos escalares con energía potencial mayor a la cinética, lo cual produce presión negativa pero en menor grado que  $\Lambda$  y con posibilidad de ir variando con la expansión del universo.

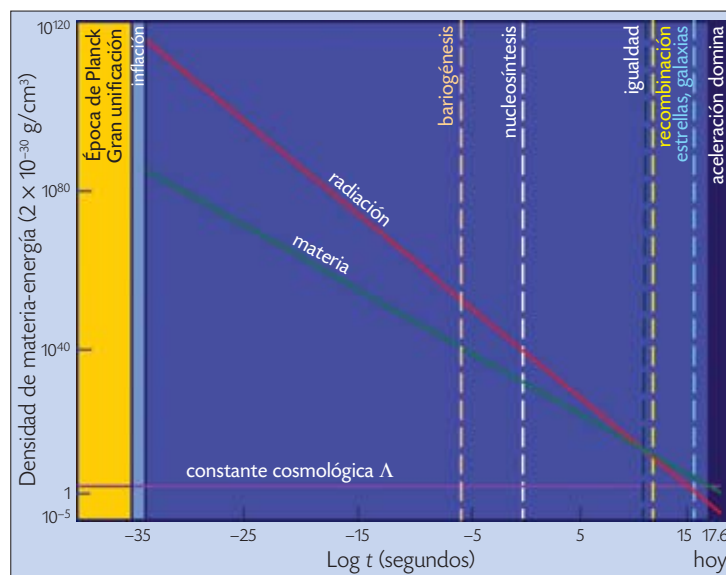
Cosmólogos mexicanos como Axel de la Macorra y Tonatiuh Matos han desarrollado atractivos modelos de campos escalares para explicar la energía oscura. Se ha propuesto también a la quintaesencia más bien como la manifestación gravitacional de extra-dimen-

siones (membranas) cercanas, mismas que se predicen en extensiones de las teorías de cuerdas. Hay argumentos también para pensar en modelos más allá de la relatividad einsteiniana, es decir, más que introducir nuevos componentes en el tensor de energía-momento, se propone modificar las leyes básicas de la gravedad. Los mencionados son sólo algunos ejemplos de la explosión de ideas que han surgido en relación con la energía oscura.

Las observaciones astronómicas tendrán seguramente la última palabra: cada modelo predice cómo se comporta la energía oscura con el tiempo, y dicho comportamiento podrá ser medido con precisión en las futuras observaciones que se planean con sofisticados métodos astronómicos, muchos de ellos basados en el estudio de las estructuras cósmicas de gran escala.

### El universo inhomogéneo: formación de estructuras y materia oscura

La radiación cósmica de fondo en microondas es evidencia de que el universo era muy uniforme hace 13 mil 700 millones de años, aunque ya existían tenues fluctuaciones con contrastes de uno en diez o cien mil. Hoy en día el universo es altamente acumulado y *grumoso*: las galaxias son objetos có-



**Figura 3.** Cambio en la densidad de la materia, la radiación y la constante cosmológica a lo largo del tiempo. La densidad está dada en unidades de la densidad de la materia en el presente. Se indican diferentes etapas relevantes de la historia del universo. Nótese que la formación de estrellas y galaxias inició después de aproximadamente 300 millones de años, mientras que el dominio de la energía oscura inició después de los 9 mil millones de años.



micos cientos de miles de veces más densos que la densidad promedio; se ordenan en estructuras de gran escala como son los *filamentos*, en la intersección de los cuales están los cúmulos de galaxias. El grueso del volumen del universo, sin embargo, son más bien enormes regiones sub-densas, los *huecos*. Esto hace que la estructura a gran escala del cosmos se asemeje a una esponja.

Y seguramente ya ronda en la cabeza del lector la pregunta: ¿cómo el universo en expansión pasó de ese estado uniforme y caliente con tenues perturbaciones al complejo tejido de estructuras actual? La respuesta a esta pregunta es el eslabón clave en nuestra comprensión de la historia del universo: es el puente entre las observaciones astronómicas y las etapas muy tempranas del universo.

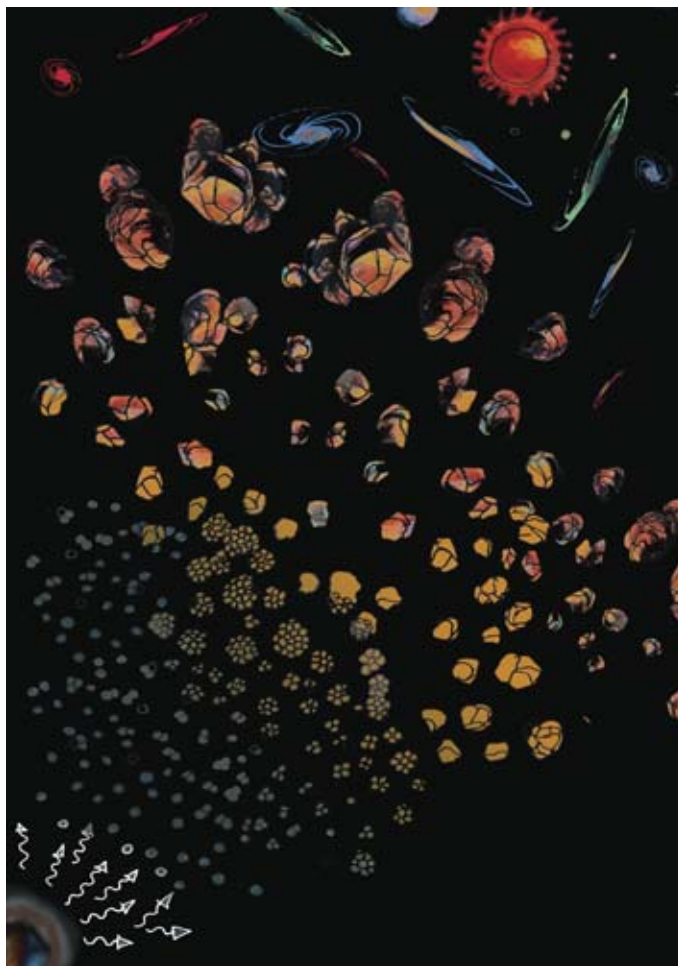
Veamos primero cómo evolucionaron las perturbaciones hasta la época de la recombinación.

La teoría más aceptada es que las fluctuaciones cuánticas del vacío se transformaron en perturbaciones de la métrica del espacio-tiempo cuando la inflación las desconectó causalmente. Por tanto, al principio toda perturbación estaba fuera del así llamado *horizonte*. En esta circunstancia, no interesa de qué está hecha la perturbación.

Con el transcurrir del tiempo, las escalas cada vez más grandes se van conectando causalmente (“cruzan el horizonte”) y entonces entran en acción los procesos microfísicos, como la presión, el transporte radiativo, la viscosidad, etcétera.

La materia bariónica se encontraba fuertemente acoplada a la radiación caliente, como ya vimos. Un análisis perturbativo del fluido materia-radiación en expansión muestra que la presión de la radiación es tan fuerte que no deja que la gravedad de la perturbación la haga más densa; ésta se mantiene en un régimen estable de *oscilaciones gravito-acústicas*. Pero lo trágico es que en perturbaciones de masas menores a las de galaxias gigantes ( $10^{13}$  masas solares), a medida que la radiación se enfría por la expansión, los fotones dejan de estar tan acoplados a la materia, de manera que se difuminan, amortiguando las oscilaciones y “planchando” en última instancia cualquier perturbación de escala galáctica. Este proceso, descubierto por J. Silk, puso en jaque a la teoría de formación de galaxias.

La solución a la crisis que mejor se apegó a las observaciones es la que propone que la mayor parte de la materia en el universo es *no bariónica*, es decir, formada por partículas elementales que no interactúan con la radiación, y por ende no sufren del amortiguamiento de Silk. En realidad hay otro proceso de “planchado” de perturbaciones que funciona siempre



El grueso del volumen del universo, sin embargo, son más bien enormes regiones sub-densas, los *huecos*. Esto hace que la estructura a gran escala del cosmos se asemeje a una esponja

## EVIDENCIAS DE MATERIA OSCURA EN LA ASTRONOMÍA

La materia oscura no bariónica tiene su motivación no sólo en la cosmología; las observaciones astronómicas la vienen sugiriendo desde los años treinta.

Obviamente, al ser oscura, no es posible captarla directamente con los telescopios. No obstante, su gravedad la delata. Siendo la forma de materia dominante en el cosmos, es de esperarse una fuerte acción gravitacional de las estructuras formadas por ella sobre el movimiento de gases, estrellas y galaxias. Observando la rotación de las galaxias espirales y el movimiento de galaxias enanas alrededor, los astrónomos deducen, por ejemplo, que las galaxias están embebidas en enormes halos oscuros 20 o 30 veces más masivos que la galaxia visible.

Así, las galaxias son apenas la punta del iceberg. Y para que no quede duda, más recientemente se hizo posible inferir la existencia de estos halos con una técnica directa llamada *lente gravitatoria*. La relatividad general predice que la luz sufre deflexiones cuando atraviesa grandes concentraciones de masa. Observando entonces galaxias de fondo muy alejadas y estudiando cómo se distorsiona su luz, se puede reconstruir la distribución de masa de la lente que produjo dicha distorsión. Los resultados son contundentes: las galaxias y cúmulos de galaxias estudiados revelan halos enormes y masivos de materia oscura.

Por otro lado, si la materia oscura fría está formada por los *neutralinos*, se predice que éstos en las regiones más densas (centros de los halos galácticos) tienen cierta probabilidad de aniquilarse produciendo radiación gamma; es decir, que siempre sí: la materia oscura tendría un cierto “brillo”.

El GLAST (ahora Fermi) es un satélite con detectores de rayos gamma que pronto estará dando resultados; si llegase a detectar rayos gamma provenientes del centro de la galaxia y de galaxias satélites cercanas, con características como las predichas en la aniquilación del neutralino, estaríamos frente a una demostración casi directa de la existencia de estas partículas de materia oscura fría.

que las partículas tengan velocidades relativistas: con estas velocidades, se le escapan a la perturbación mientras sean menores que cierto tamaño. Esto motivó a clasificar a la materia no bariónica en *fría*, *tibia* y *caliente*. Para partículas que nacen en equilibrio térmico, las menos masivas se vuelven no relativistas más tarde. Por ejemplo, para los neutrinos, el flujo libre dura tanto que perturbaciones de escalas miles de veces una galaxia son borradas; peor que el caso de los bariones solos. Y es una lástima, pues el neutrino es la única partícula no bariónica detectada.

Por el contrario, las perturbaciones hechas de partículas más masivas, como las predichas

en modelos de supersimetría (por ejemplo, el *neutralino*), o que simplemente nacen frías (*axiones*), sobreviven prácticamente a todas las escalas. El caso intermedio corresponde a las perturbaciones hechas de materia oscura tibia; escalas menores que las subgalácticas, son borradas.

Pero, ¡qué cosas estamos diciendo! Las propiedades de las partículas elementales (micromundo) determinan las propiedades de las galaxias (macromundo). Entonces, ¿será que con telescopios podemos indagar sobre la esencia de la materia? Así es. Y es por eso que la astronomía disparó una gran actividad de generación de propuestas y búsqueda experimental de posibles partículas exóticas no bariónicas.

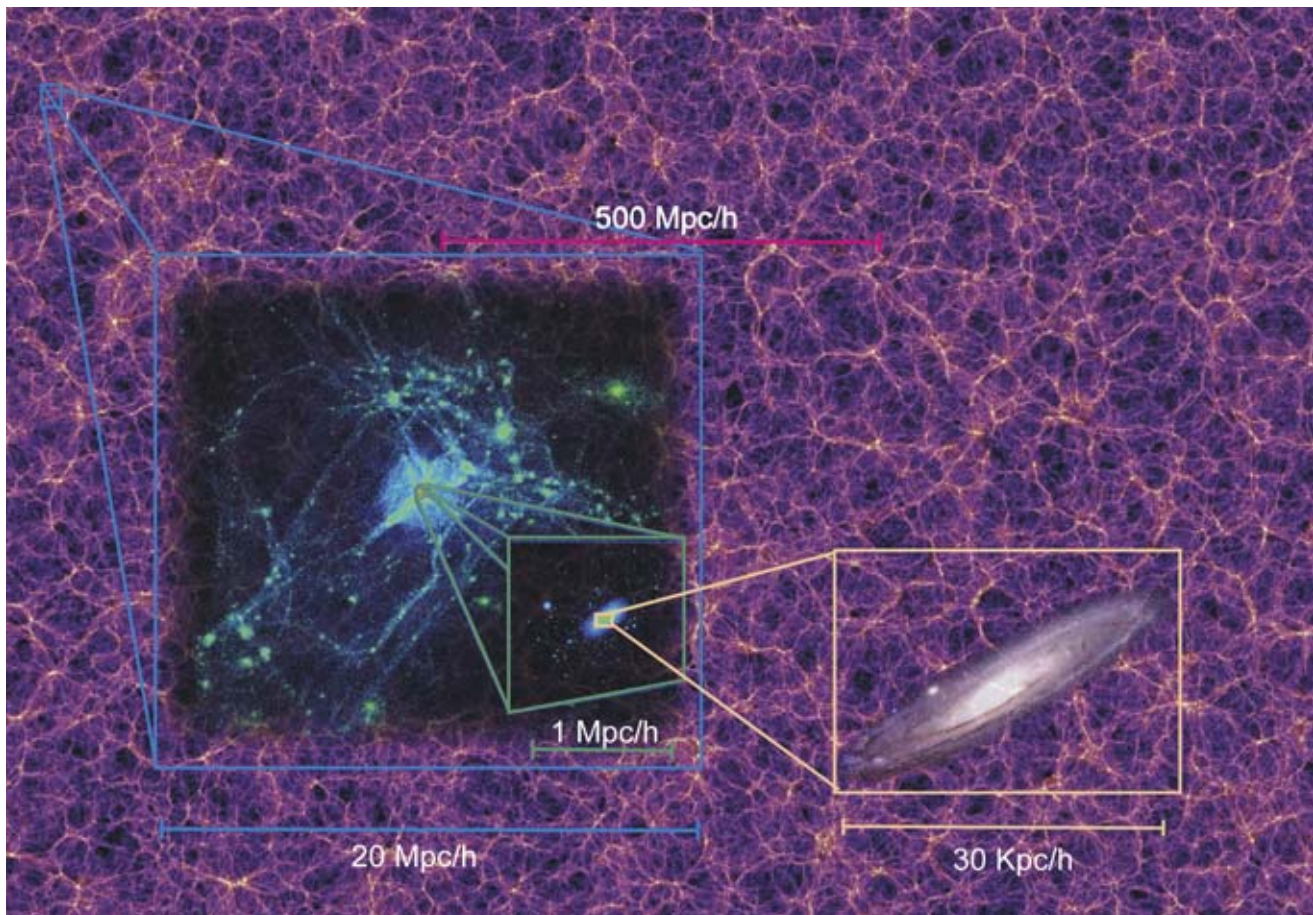
La materia oscura fría (MOF, o incluso podría ser la tibia, MOT) salva el problema del “planchado” de las perturbaciones galácticas primigenias. Las perturbaciones de materia os-

cura fría evolucionan gravitacionalmente, creciendo en contraste hasta que su autogravedad es tan grande que se separan de la expansión del universo y se colapsan, formando gigantes esferoides oscuros en equilibrio llamados *halos*. El gas bariónico es atrapado gravitacionalmente en los pozos de potencial oscuros; a diferencia de la materia oscura, la bariónica disipa su energía en procesos radiativos, y se acumula más y más en el centro de los halos hasta alcanzar densidades que permiten la formación estelar: así, literalmente, se da a luz a las galaxias.

El autor, en colaboración con Claudio Firmani y otros colegas, ha desarrollado modelos que siguen todas estas fases evolutivas hasta la época actual. Las galaxias modeladas reproducen gran parte de las propiedades observadas, mostrando la solidez del modelo de la materia oscura fría. Uno de los padres de este

modelo, gestado originalmente a mediados de los ochenta, es el mexicano Carlos Frenk.

Las simulaciones numéricas en supercomputadoras han sido clave para seguir el complejo proceso no lineal de ensamblaje gravitacional de las estructuras de materia oscura fría a partir de las perturbaciones primigenias. En la Figura 4 se muestran resultados de una simulación espectacular hecha por el grupo de Frenk, donde se aprecia la estructura de esponja (materia oscura) a gran escala del universo. Pero también existe mucha subestructura dentro de los halos oscuros, como se aprecia en el panel al medio de la Figura 4; ésta es una resimulación de un halo galáctico en un fila-



**Figura 4.** Fondo: estructura de esponja simulada del universo al día de hoy, producto de la acción gravitacional, única interacción importante a grandes escalas en un universo dominado por la materia oscura fría (simulación del milenio, del consorcio Virgo, cortesía de V. Springel y colaboradores). Recuadro al medio: simulación de materia oscura fría de una región intermedia del universo y resimulación con alta resolución de un solo halo de masa similar a la Vía Láctea. Este halo, parte de un filamento, está plagado a su vez de pequeños sub-halos (cortesía del grupo *N-body Shop* y O. Valenzuela). La formación de las galaxias tiene lugar en los centros de los halos oscuros.

mento. La existencia de esa subestructura es crucial para la formación de galaxias satélite, pero muchas otras simplemente quedarán oscuras, lo cual es una predicción del modelo que tendrá que ser comprobada. Si la materia oscura es tibia en vez de oscura, prácticamente no se formarán estas subestructuras. Lo que es cierto es que la cosmología ha logrado penetrar hasta las regiones subgalácticas. Pedro Colín, Octavio Valenzuela y el autor estamos trabajando en México sobre estos aspectos.

### Una verdadera época de oro

La cosmología se ha transformado en una ciencia experimental. El modelo cosmológico heurístico que se ha ido gestando con la interconexión de teoría y observación es muy exitoso en su capacidad descriptiva de la realidad, pero no ha sido muy elegante en su alcance predictivo. Se han tenido que poner muchos “parches” durante su construcción, como son los mismos conceptos de materia y energía oscuras. Una analogía quizás apropiada es la de la teoría de los epiciclos de Aristóteles-Ptolomeo: llegó a describir muy bien el movimiento aparente de los planetas, estimulando el acopio de más observaciones y la búsqueda subsiguiente de otros modelos.

Cualquiera que sea la nueva teoría del universo y la materia, tendrá en la *Materia Oscura Fría con Constante Cosmológica* (MOF- $\Lambda$ ) el mejor modelo de ajuste a las observaciones. Y los conceptos de materia y energía oscuras descubiertos por las observaciones en el seno de este modelo son, sin duda, los grandes misterios que nos conducirán al descubrimiento de nuevas componentes fundamentales de la naturaleza, o bien a una nueva modificación de las leyes actuales de la física, en especial las concernientes a la gravedad.

### Para saber más

Ávila-Reese, V. y P. Colín (2006), “Formación y evolución de galaxias”, en Peimbert, M. (compilador), *La evolución en la astronomía*, El Colegio Nacional, pp. 85-108.

Ávila-Reese, V. (2007), “Understanding galaxy formation and evolution”, en Carramiñana, A. y colaboradores (editores), *Solar, stellar and galactic connections between particle physics and astrophysics*, Alemania, Springer, pp. 115-164.

Peimbert, M. (2006), “La evolución del universo”, en M. Peimbert (compilador), *La evolución en la astronomía*, El Colegio Nacional, pp. 145-164.

**Vladimir Ávila-Reese** es investigador titular del Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), miembro del Sistema Nacional de Investigadores y de la Academia Mexicana de Ciencias. Obtuvo la licenciatura y maestría en la Universidad Estatal de San Petersburgo, Rusia, y el doctorado en la UNAM. Es especialista en cosmología y astronomía extragaláctica, y ha publicado numerosos artículos de alto impacto en estos campos.

avila@astroscu.unam.com