

Revoluciones **copernicanas:** mundos y sustancias exóticas

Itziar Aretxaga



El ser humano ha podido constatar que, lejos de ser el centro del Universo, como antaño lo creyera, existen millones de mundos habitables en nuestra galaxia, y que ésta es una entre cientos de miles de millones de galaxias donde podrían existir otros mundos que alberguen vida.

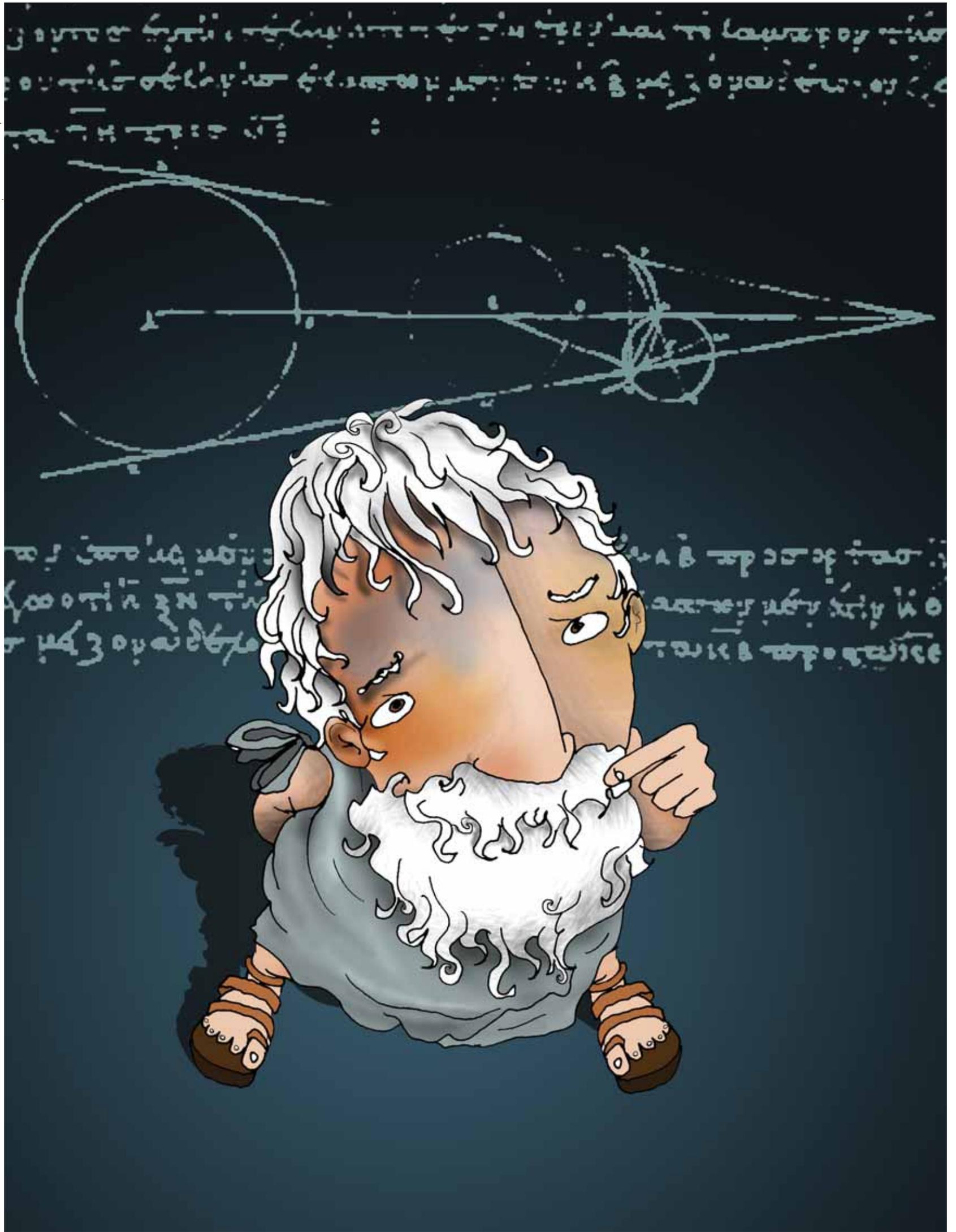
La cultura occidental ha experimentado diferentes revoluciones cosmológicas a lo largo de su historia, y con ello hemos ido modificando nuestra visión de la relevancia de la humanidad en el universo físico.

En el siglo xvii el modelo predominante, que situaba la Tierra en el centro del cosmos, fue gradualmente desplazado por el modelo copernicano en el que el Sol ejercía como astro central, ya que así las posiciones y fases planetarias se predicaban de forma más simple y precisa.

En 1918 este modelo fue desbancado, pues el Sol pasó a localizarse en la periferia de nuestra galaxia, luego de que Harlow Shapley (1885-1975) midiera las distancias a estrellas tipo Cefeida de la Vía Láctea, para lo que aplicó la relación descubierta por Henrietta Swan Leavitt (1868-1921) entre la luminosidad intrínseca de estas estrellas y el periodo de sus variaciones lumínicas.

Esta segunda revolución copernicana, en la que se estableció que ni la Tierra ni el Sol marcan el centro del Universo, se vio rápidamente seguida por una tercera: la constatación, realizada por Edwin Hubble (1889-1953), de que existen galaxias independientes de la nuestra, a grandes distancias; para ello aplicó el mismo método de Leavitt a las variaciones lumínicas de estrellas cefeidas en nebulosas difusas conocidas.

El principio cosmológico establece que a grandes rasgos el Universo tiene propiedades similares en todo sitio y dirección. En conjunción con la formulación de





la gravedad de Albert Einstein (1879-1955), reproduce adecuadamente las observaciones de galaxias que se alejan unas de otras, descubierta en los años veinte del siglo pasado por el propio Hubble, y colaboradores, y nos ha llevado a la conclusión inevitable de que nuestra galaxia, la Vía Láctea, no ocupa una posición privilegiada entre los millones de galaxias que hoy en día hemos catalogado. Es sólo una más; no se sitúa en el centro del Universo en expansión.

El siglo xx trajo avances tecnológicos que nos permitieron explorar el cielo a través de la radiación que recibimos en todo lo ancho del espectro electromagnético: radio, milimétrica, infrarroja, visible, ultravioleta, rayos X y gamma (de menor a mayor energía). Hoy conocemos, gracias a estos avances, los confines del universo observable, y medimos con precisión distancias y tiempos cósmicos. La porción que podemos observar tiene actualmente un tamaño de unos 45 000 millones de años luz de radio (un año luz = 9.5 billones de kilómetros), si pudiéramos detener la expansión del Universo en este instante, y una edad de 13 700 millones de años.

Estos avances tecnológicos también nos han llevado a descubrir la existencia de mundos y sustancias exóticas, que dan origen a nuevas revoluciones copernicanas. Algunas de ellas se discutieron en la reunión general *Ciencia y humanismo*, organizada por la Academia Mexicana de Ciencias a principios de 2012.

No sólo átomos: componentes oscuras

A partir de los años treinta del siglo xx se encontró que tanto los movimientos de las galaxias en grandes agrupaciones –a las que llamamos cúmulos– como los movimientos ordenados de rotación de las estrellas alrededor de los núcleos de las galaxias implicaban que, de mantenerse válida la teoría gravitatoria de Newton (o de Einstein), hay un faltante de masa que no vemos. De otro modo, las velocidades registradas serían demasiado altas y las componentes escaparían del campo gravitatorio del sistema, con lo que éste se desintegraría. A esta componente invisible se le conoce como *materia oscura*.

Las teorías de formación de galaxias, que siguen la agregación de la materia desde las fluctuaciones de

densidad develadas en la imagen más antigua que tenemos del Universo, la del *fondo cósmico de radiación de microondas*, requieren de un tipo dominante de materia que no interactúe con la luz. Eso implica que la materia oscura no puede tener la misma naturaleza que las partículas elementales que integran los átomos: protones, neutrones y sus parientes más cercanos, a los que denominamos formalmente *materia bariónica*, y que aquí llamaremos materia ordinaria.

Además, la abundancia de elementos químicos ligeros como el helio o el deuterio, que se deduce se generan en los primeros minutos de vida del Universo, y se pueden medir en astros poco evolucionados, implica que la densidad promedio del Universo hoy en día debe ser de tan sólo unos cuatro protones (o neutrones) por metro cúbico. Esta densidad es unas seis veces

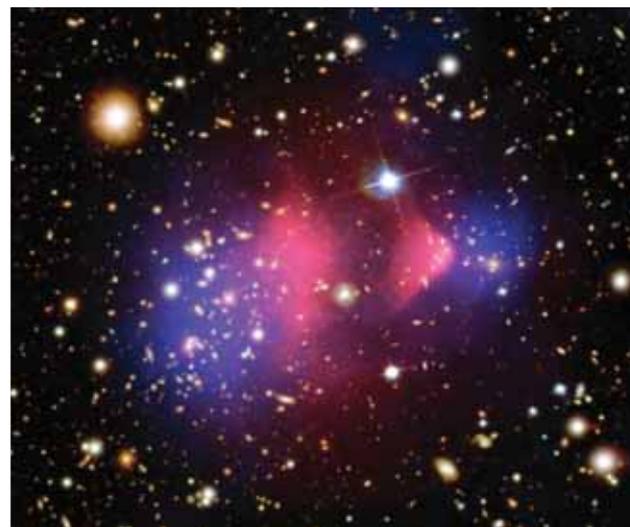


Figura 1. El cúmulo de la Bala, a una distancia de 3 830 millones de años luz, está compuesto por la colisión de dos cúmulos de galaxias; el de la derecha (la Bala, propiamente) ha atravesado ya el cúmulo de la izquierda, hace unos 150 millones de años. En colores blanquecinos se aprecia la imagen visual de las miles de galaxias que componen los cúmulos. En rojo se señala la distribución del gas caliente y difuso que emite rayos X, componente dominante de la materia ordinaria en este sistema. En azul se representa la distribución de materia que se deduce afecta a las galaxias de fondo, por detrás del sistema de cúmulos en colisión, cuyas imágenes se ven distorsionadas por la acción del campo gravitatorio de los cúmulos. La imagen azul es una reconstrucción de la distribución de materia que debe crear ese campo gravitatorio, mucho más intenso que el de las propias galaxias del cúmulo: ésta es la *materia oscura*. La componente oscura, al igual que la distribución de galaxias, sufre un choque elástico que no las deforma. El gas difuso, dominante en el inventario de materia ordinaria, sin embargo, se comprime en el choque, y aparece disociado de la dinámica de las componentes galáctica y de materia oscura. (Créditos: NASA/CXC/CfA/M. Markevitch *et al.*; NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/U. Arizona/D. Clowe *et al.*)

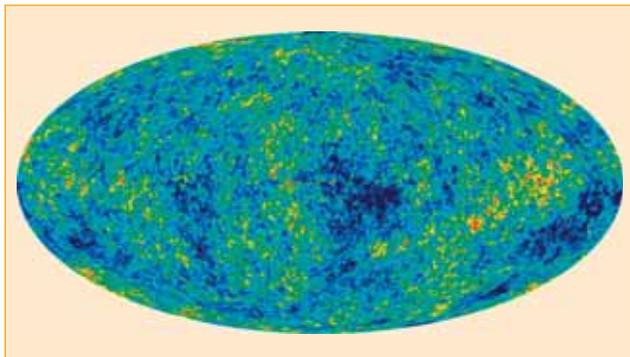


Figura 2. El fondo cósmico de radiación de microondas, liberado cuando los electrones se combinaron con los núcleos de la materia ordinaria para formar átomos. Es la imagen más antigua del Universo que se ha obtenido, emitida cuando éste tenía unos 370 000 años (0.003% de su edad actual). Las fluctuaciones de la temperatura de la radiación milimétrica registrada entre diferentes zonas del cielo, representadas por colores (rojo, más caliente; azul, más frío), permiten medir con gran fidelidad la cantidad de materia ordinaria, oscura y energía oscura del Universo. (Créditos: NASA/WMAP.)

menor que la densidad promedio derivada a través de los movimientos de las galaxias en cúmulos. Así, conocemos la existencia de la materia oscura a través de su efecto gravitatorio sobre la materia ordinaria de las galaxias, pero su naturaleza nos es desconocida.

Diferentes teorías postulan la existencia de familias de partículas elementales que pueden dar cuenta de esta materia faltante, y se espera que en esta década una diversidad de experimentos astronómicos y terrestres determinen la naturaleza de esta forma de materia exótica.

Más exótica aún es la naturaleza de la llamada *energía oscura*, a la que se le atribuye la aceleración de la expansión del Universo, recientemente descubierta por grupos de astrofísicos que miden el brillo de supernovas, estrellas en explosión al final de su evolución, en galaxias distantes. Por este descubrimiento se les otorgó el premio Nobel de Física 2011 a los líderes de esos equipos, Saul Perlmutter (1959-), Brian Schmidt (1967-) y Adam Riess (1969-). La luminosidad de este tipo de explosiones es muy similar de estrella a estrella, de manera que el brillo detectado en Tierra da una idea de la distancia a la que se encuentra el objeto –así como los faros de un auto se ven menos y menos brillantes cuanto más lejos esté. A finales de los años noventa del siglo pasado, estos astrofísicos llegaron a la conclusión de que los brillos de estas explosiones eran demasiado débiles para sus distancias estimadas, salvo

MATERIA OSCURA

El concepto de materia faltante u oscura fue propuesto en los años treinta del siglo XX independientemente por Jan Oort (1900-1992), quien observó las velocidades orbitales de estrellas en la Vía Láctea, y por Fritz Zwicky (1898-1974), quien midió las velocidades relativas de galaxias en el cúmulo de Coma, dándose cuenta de que para que estuvieran ligadas gravitatoriamente se necesitaba más masa que la contenida en las galaxias del cúmulo.

En las décadas de 1970 y 1980, Vera Rubin (1928-) y sus colaboradores aportaron evidencia de que la mayoría de las galaxias espirales tienen una componente de masa oscura, si se admite como válida la mecánica newtoniana: las estrellas más externas de las galaxias tienen velocidades de rotación respecto al núcleo galáctico muy similares a las de órbitas más internas, muy al contrario que en un sistema planetario dominado por la masa de su estrella central, donde los planetas más externos tienen velocidades menores que los internos.

La evidencia de existencia de materia oscura se concentra en la dinámica de las galaxias o en sistemas de galaxias, pero además ha sido medida a través de su efecto de amplificación de la luz proveniente de galaxias distantes y en las fluctuaciones del fondo cósmico de radiación de microondas. Aunque el consenso científico es que estos efectos se deben muy probablemente a una componente difusa de materia en forma de partículas elementales, hasta ahora no identificadas en laboratorio, existen grupos de investigadores que estudian modificaciones de la fuerza de gravedad para explicar estos fenómenos sin la necesidad de invocar una componente exótica de materia. Sin embargo, hasta el momento, no han logrado reproducir satisfactoriamente todos los tipos de sistemas donde ésta se ha detectado.





si las distancias eran mucho mayores que las que permitía un universo sólo poblado de materia ordinaria y oscura.

La energía oscura que dedujeron existe, tiene la propiedad de ejercer una presión negativa, y no hay sustancia conocida que tenga esta propiedad, salvo el propio vacío. Sin embargo, las propiedades de vacío que



El único modelo de vida que tenemos es el de la propia Tierra, un planeta rocoso, con agua líquida y atmósfera. Se piensa que un planeta habitable necesita agua, porque es el medio idóneo para transportar, acumular y agregar los compuestos químicos necesarios

predicen las teorías físicas implican efectos de presión negativa más de 100 órdenes de magnitud (un uno seguido de 100 ceros) menores a lo medido en la expansión acelerada del Universo. A esta discrepancia se le llama, irónicamente, el “problema de ajuste fino” de la cosmología contemporánea.

Algunos investigadores proponen que la solución debe venir de nuevas teorías físicas. La existencia de un efecto de antigravedad, como el creado por una presión negativa, se ha corroborado con otras medidas astrofísicas, como en las fluctuaciones del fondo cósmico de radiación de microondas, o en la distribución de cúmulos de galaxias y regiones semivacías hallada en grandes censos del cielo.

El contenido de materia y energía oscura en el Universo es dominante: actualmente 96% de la materia-energía es exótica, y no conocemos su naturaleza, aunque podemos medir su abundancia y algunas de sus propiedades muy precisamente. Tan sólo el 4% restante son átomos como los que conocemos. En estas décadas hemos vivido, por tanto, la revolución copernicana más drástica de la historia: no sólo somos polvo de estrellas, material reciclado por las mismas, sino que ni las estrellas, ni los planetas ni nosotros mismos somos la sustancia más común del Universo.

Las teorías físicas actuales especulan sobre si el Universo es único (de ahí el “uni” de su nombre) o si, por el contrario, el nuestro es sólo una pieza de un *multiverso*, en el que se han propiciado unas propiedades físicas muy específicas. A estas alturas, de ser corroboradas estas ideas, una revolución copernicana más nos tomaría por sorpresa.

Otras tierras

Estemos o no hechos de la sustancia principal del Universo, está claro que nuestra cultura, o nuestra propia especie, nos impulsa a interesarnos por lo humano, y en el ámbito astronómico esto se traduce en la búsqueda de las condiciones físicas, químicas y biológicas que posibilitaron el surgimiento del ser humano, la Tierra y su entorno. Quizá no sea de extrañar que una parte sustancial del esfuerzo astronómico en este siglo se esté orientando a buscar nuevos mundos capaces de albergar vida, nuevas tierras.

Cuando una nube difusa de gas de una galaxia se contrae por acción de su propia gravedad debido a que suele tener algo de giro, forma un disco delgado en rotación alrededor del centro denso que llegará a constituir una nueva estrella. Los discos, con tamaños de unas 100 unidades astronómicas (UA; la distancia de la Tierra al Sol, unos 150 millones de kilómetros), sirven para engordar la futura estrella, y también para formar los futuros sistemas planetarios. El proceso de fragmentación del disco y el surgimiento de planetas dentro del mismo es un tema vigente de investigación.

Las primeras imágenes de discos *protoplanetarios* se obtuvieron en la década de los noventa del siglo pasado, mediante observaciones milimétricas sensibles a la luz emitida por el polvo cósmico (granos de silicatos y otros compuestos pesados de hasta 0.1 milímetros), abundante en estos discos. La nueva generación de telescopios milimétricos permitirá localizar nuevos discos para estimar su prevalencia y hacer imágenes de gran fidelidad con las que podamos dilucidar sus extensiones, composición y cinemática, y así entender el proceso de formación planetaria.

Desde que en 1995 se descubriera el primer planeta fuera del Sistema Solar, hoy conocemos más de 800 planetas asociados a más de 600 sistemas planetarios, la mayoría de los cuales están integrados por planetas gigantes gaseosos tipo Júpiter (la técnica más extendida de búsqueda favorece la detección de este tipo de planetas gigantes). El observatorio espacial Kepler tiene como misión descubrir planetas de tamaño y órbita similares a la Tierra, con el objetivo de explorar los procesos cósmicos que posibilitan la vida en el Universo.

El único modelo de vida que tenemos es el de la propia Tierra, un planeta rocoso, con agua líquida y atmósfera. Se piensa que un planeta habitable necesita agua, porque es el medio idóneo para transportar, acumular y agregar los compuestos químicos necesarios.

Para poder preservar el agua en fase líquida se necesita una atmósfera que mantenga la presión adecuada, conserve parte de la energía estelar que recibe y mantenga la temperatura lejos del punto de congelación o ebullición del agua. La existencia de agua y atmósfera depende de las condiciones químicas locales y de la evolución inicial del planeta, pero para que éste pueda retenerlas una vez formadas, la masa del planeta tiene

HOYOS NEGROS, OTRO TIPO DE MATERIA OSCURA

En la década de los noventa del siglo XX se inició una intensa búsqueda de astros colapsados en el halo de nuestra galaxia, como hipótesis de materia oscura faltante.

La técnica empleada se basaba en la detección de magnificaciones gravitatorias de la luz proveniente de estrellas del halo al pasar cerca de estos astros oscuros. La conclusión a la que se llegó es que, como mucho, el 20% de la materia oscura de la Vía Láctea podría estar concentrada en este tipo de astros, entre los que se encuentran las estrellas de neutrones y los hoyos negros estelares, fruto de la evolución de estrellas masivas.

Los hoyos negros, objetos de tal densidad que ni la luz puede escapar de su campo gravitatorio más allá de un cierto radio característico, fueron predichos en 1915 por Karl Schwarzschild (1873-1916) como una solución a la formulación gravitatoria de Einstein. Por décadas fueron un ente teórico, hasta que se calcularon las masas de los astros alrededor de los cuales orbita el material emisor de rayos X en sistemas estelares binarios. Cygnus X-1, el primer hoyo negro confirmado, en 1972, con una masa de 14.8 masas solares, no puede ser ningún otro tipo de objeto colapsado clásico, como una estrella de neutrones.

Hoy en día se conocen hoyos negros de unas pocas hasta miles de millones de masas solares. El del centro de nuestra galaxia tiene unos 4.3 millones de masas solares, medido a través de los movimientos orbitales de estrellas cercanas. Se cree que este tipo de hoyos negros muy masivos son comunes en todos los centros de galaxias gigantes. Su mecanismo de formación está todavía bajo debate, y se postula que es un proceso ligado a la formación de la propia galaxia.



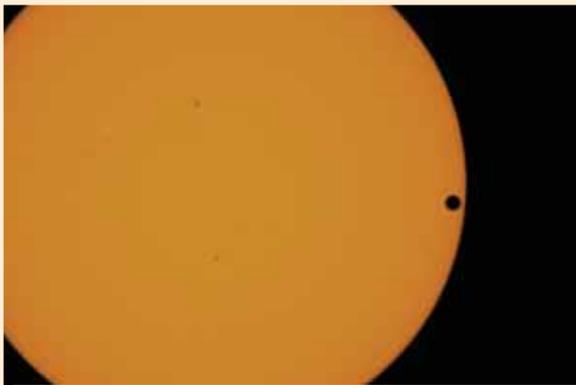


que ser suficientemente grande. Por otra parte, si es demasiado grande, la atmósfera estará dominada por hidrógeno, y eso no facilitará la formación de moléculas complejas.

TRÁNSITOS PLANETARIOS

El método utilizado por la misión Kepler para descubrir planetas es el paso (tránsito) de un planeta entre la estrella y el observador. El tránsito bloquea la luz proveniente de una pequeña porción de la estrella, y se manifiesta como una disminución del brillo observado.

Kepler es capaz de detectar variaciones de hasta 1%. En la Tierra estamos acostumbrados a observar tránsitos de los planetas internos a la Tierra, Mercurio y Venus, como el que se observó en México la tarde del 5 de junio de 2012, cuando el disco de Venus recorrió una trayectoria sobre el disco solar. De la misma manera, se pueden registrar las variaciones del brillo de estrellas lejanas y descubrir sus sistemas planetarios. Kepler ha registrado miles de candidatos a tránsitos que después tienen que ser confirmados por éste y otros telescopios. Además de confirmar su naturaleza, eso permite calcular el tamaño de los planetas, su masa, órbita y temperatura. Estas propiedades son fundamentales para estimar la posibilidad de que el planeta pueda albergar vida.



Tránsito de Venus el 5 de junio de 2012, observado desde San Miguel Allende, Guanajuato. El disco redondo de Venus aparece bien dibujado sobre el disco solar a su entrada en el tránsito. Además, se aprecian manchas solares de contornos irregulares y difusos producidas por el campo magnético del Sol. (Créditos: INAOE/V. de la Luz.)



Figura 3. Los telescopios de nueva generación, como el Gran Telescopio Milimétrico, en la cima del volcán Tlitépetl del estado de Puebla, permiten realizar estudios de materia y energía oscura a través de la distribución de galaxias descubiertas en grandes censos del cielo, del fondo cósmico de radiación de microondas, así como de los sistemas de estrellas en formación y sus discos protoplanetarios. (Créditos: GTM/D. Gale.)

Bajo estos criterios se estima que un planeta habitable debe tener entre 1 y 10 veces la masa de la Tierra. Unos 50 de los 800 planetas conocidos tienen masas en este intervalo. Además, no debe estar ni demasiado lejos ni demasiado cerca de la estrella, para mantener la temperatura idónea. Kepler-22b, planeta descubierto por la misión Kepler, se encuentra en esta zona habitable. Todavía no se ha confirmado la presencia de agua líquida en ninguno de estos mundos.

Para que el planeta pueda albergar vida, además, debe localizarse en una zona de la galaxia que haya experimentado las suficientes generaciones de estrellas como para contener los elementos químicos comunes a todas las formas de vida conocidas: carbono, oxígeno, nitrógeno, azufre, potasio, magnesio y hierro, que no se formaron al principio del Universo. La teoría de formación y evolución de galaxias permite calcular cuáles son las zonas habitables de la galaxia, de forma que contengan suficientes cantidades de estos elementos.

Además, el sistema planetario debe estar lejos de regiones donde son frecuentes las explosiones de supernovas, que podrían esterilizar la vida en el planeta con su intensa radiación, o los encuentros cercanos entre estrellas, que pueden desestabilizar las órbitas de los planetas y alejarlos de la zona de habitabilidad estelar. Estos procesos catastróficos son relativamente frecuentes, en escalas de millones de años, en los centros de formación estelar reciente y en las zonas centrales de las galaxias, donde la densidad estelar es mayor. Así, la zona de habitabilidad galáctica define un cinturón de entre unos 10 a 30 000 años luz del centro galáctico. El Sol está a 26 000 años luz.

Una vez que un planeta ha formado su atmósfera es difícil saber cuándo surgirá la vida, porque se desconocen los detalles del origen de la vida. Si se toma como referencia la Tierra, la vida básica, como la de las bacterias, podría aparecer cuando el planeta tiene unos 1 000 millones de años de edad. Una sociedad con tecnología de comunicación podría florecer en unos 4 000 millones de años. Algunos investigadores sostienen que 1% de todas las estrellas con planetas pudieron haber sido capaces de mantener vida en algún momento de la historia de la Vía Láctea, lo que corresponde a unos 1 000 millones de estrellas en nuestro sistema galáctico.

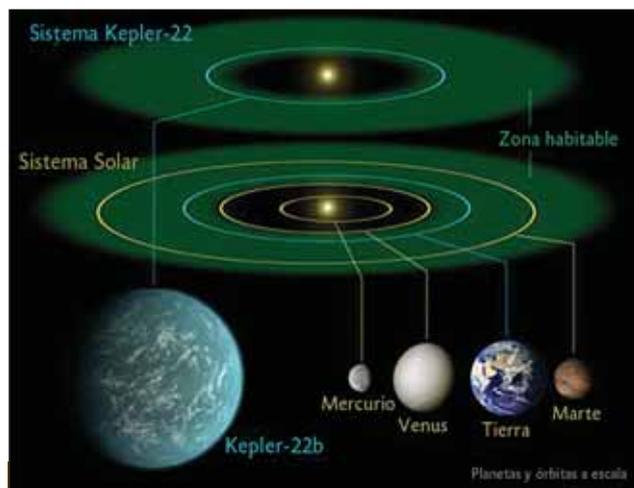


Figura 4. Impresión artística de Kepler-22b, uno de los planetas descubiertos por la misión Kepler, dentro de la zona de habitabilidad de su estrella, donde podría mantener agua líquida. Se muestra en comparación con el Sistema Solar y el tamaño de los planetas internos. Kepler-22b tiene una órbita de 289 días, y 2.4 veces el tamaño de la Tierra. (Créditos: NASA/Ames/JPL-Caltech.)

Una reflexión

Como civilización hemos recorrido un largo camino: de sostener que nuestro planeta es el centro del Universo y el ser humano la pieza central del mismo, a darnos cuenta de que hay millones de mundos habitables en nuestra galaxia, que es una de los cientos de miles de millones de galaxias de nuestro Universo en expansión.

Pensamos que los átomos de los que estamos hechos no son la sustancia dominante del Universo, y que quizá éste no sea el único Universo que exista. La enormidad de las dimensiones cósmicas nos hace estremecernos por nuestra pequeñez, y al mismo tiempo por nuestra grandeza, pues somos capaces de comprender esta realidad a través del razonamiento crítico.

Itziar Aretxaga es investigadora titular del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) y miembro del Sistema Nacional de Investigadores y de la Academia Mexicana de Ciencias, en la que ejerce como coordinadora de astronomía desde 2006. Su investigación versa sobre la formación y evolución de galaxias.

Aretxagaitziar@inaoep.mx

Lecturas recomendadas

Alcorcón Contreras, R. M. (editor, 2012), *Memorias de la conferencia Ciencia y humanismo*, México, Academia Mexicana de Ciencias. Disponible en <www.amc.unam.mx>.

Carrasco, E., I. Aretxaga y W. I. Irvine (compiladores, 2006), *El gran telescopio milimétrico: dos países vecinos exploran juntos el cosmos*, México, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. Disponible en <www.lmtgm.org/book/lmtbook-spanish.html>.

Matos, T. (2004), *¿De qué está hecho el Universo? Materia oscura y energía oscura*, México, Fondo de Cultura Económica.

Rodríguez, L. F. (2005), *Un Universo en expansión*, México, Fondo de Cultura Económica, colección La ciencia para todos.

Tenorio-Tagle, G. y C. Muñoz-Tuñón (2004), *La luz con el tiempo dentro*, México, Fondo de Cultura Económica.