

El universo que falta

Sólo podemos explicar el 4 por ciento del cosmos

Las tribus indias que rodean la soñolienta ciudad de Flagstaff, en Arizona, tienen una interesante interpretación de la lucha humana por la paz y la armonía. Según sus tradiciones, las dificultades y confusiones de la vida tienen sus raíces en la disposición de las estrellas en los cielos (o, más bien, en la falta de ésta). Estas joyas en el cielo estaban destinadas a ayudarnos a encontrar una existencia tranquila y satisfecha, pero cuando Primera Mujer utilizó las estrellas para escribir las leyes morales en la oscuridad, Coyote perdió la paciencia y las lanzó de su cuenco, esparciéndolas por los cielos. De la impaciencia inicial de Coyote vino la confusión de constelaciones en los cielos y el caos de la existencia humana.

Los astrónomos que pasan las noches observando los cielos sobre Flagstaff pueden encontrar un cierto consuelo en esta leyenda. Sobre la colina que domina la ciudad se halla un telescopio cuyas observaciones de los cielos, del revoltijo de estrellas y de la manera en que se mueven, nos han sumido en una profunda confusión. A principios del siglo xx, la luz de las estrellas que pasaba a través del telescopio Clark del Observatorio Lowell de Flagstaff inició una cadena de observaciones que nos ha conducido a uno de los descubrimientos más extraños de la ciencia: que la mayor parte del universo falta.

Si el futuro de la ciencia dependiera de identificar las cosas que no tienen sentido, el cosmos tiene muchas que ofrecer.

Ansiamos saber de qué está hecho el universo, cómo funciona realmente; en otras palabras, sus partículas constituyentes y las fuerzas que guían sus interacciones. Ésta es la esencia de la «teoría final» con la que sueñan los físicos: una suma concisa del cosmos y de sus reglas de compromiso. A veces, informes en periódicos, revistas y la televisión dan la impresión de que casi lo hemos conseguido. Pero no es así. Será difícil encontrar esta teoría final hasta que no resolvamos el hecho de que la mayoría de partículas y fuerzas que se supone que describe son completamente desconocidas para la ciencia. Tenemos el gran privilegio de vivir en la edad de oro de la cosmología; sabemos muchísimo acerca de cómo llegó a formarse el cosmos, de cómo evolucionó hasta su estado actual, y sin embargo no sabemos realmente qué es la mayor parte de él. Falta casi todo el universo; el 96 por ciento, para poner una cifra.

Las estrellas que vemos en los confines de galaxias distantes parecen moverse bajo la guía de manos invisibles que mantienen a las estrellas en su lugar y les impiden volar hacia el espacio vacío. Según nuestros mejores cálculos, la sustancia de estas manos guidoras invisibles (que los científicos conocen como *materia oscura*) supone casi la cuarta parte de la cantidad total de la masa del cosmos. Pero materia oscura es sólo un nombre. No tenemos ningún indicio de qué pueda ser.

Y después está la *energía oscura*. Cuando Albert Einstein demostró que la masa y la energía eran como las dos caras de la misma moneda, que una podía convertirse en la otra utilizando la receta $E = mc^2$, inadvertidamente puso los cimientos de lo que en la actualidad se considera el problema más embarazoso de la física. Energía oscura es el nombre que dan los científicos a la esencia fantasmal que hace que el tejido del universo se expanda cada vez más deprisa, creando cada vez más espacio vacío entre las galaxias. Si se usa la ecuación de Einstein para convertir energía en masa, se descubrirá que la energía oscura es en realidad el 70 por ciento de la masa (según Einstein, deberíamos llamarla realmente masa-energía) del cosmos. Nadie sabe de dónde procede dicha energía, qué es, si seguirá acelerando para siempre la expansión del universo, o si acabará por perder potencia. Cuando se trata de los principales constitu-

yentes del universo, parece que nadie sabe demasiado de nada. El familiar mundo de los átomos (el material del que estamos hechos) explica sólo una minúscula fracción de la masa y la energía del universo. El resto es un rompecabezas que todavía no se ha resuelto.

¿Cómo hemos llegado hasta aquí? Debido a la obsesión de un hombre por la vida en Marte. En 1894, Percival Lowell, un adinerado industrial de Massachusetts, se había obsesionado con la idea de que en el planeta rojo existía una civilización extraña. A pesar de las burlas despiadadas de muchos astrónomos de la época, Lowell decidió buscar pruebas astronómicas irrefutables que respaldaran su convicción. Envío a un explorador a varias localidades de los Estados Unidos; al final, se decidió que los claros cielos de Arizona sobre Flagstaff eran perfectos para su propósito. Después de un par de años de observar con telescopios pequeños, Lowell adquirió un refractor de 61 centímetros, enorme (para la época), a un fabricante de Boston, y lo envió a Flagstaff mediante el ferrocarril de Santa Fe.

Así empezó la era de la gran astronomía. El telescopio Clark le costó a Lowell veinte mil dólares y está alojado en una magnífica cúpula revestida de pino en la cima de Mars Hill, una pista zigzagueante y empinada cuyo nombre hace honor a la gran obsesión de Lowell. El telescopio tiene un lugar seguro en la historia: en la década de 1960, los astronautas de la misión Apolo lo utilizaron para echar su primer vistazo a los lugares de alunizaje previstos. Y, décadas antes, un joven honesto y reservado llamado Vesto Melvin Slipher lo empleó para poner en marcha la cosmología moderna.

Slipher nació en 1875 en una granja de Indiana. Llegó a Flagstaff como ayudante de Lowell en 1901, inmediatamente después de graduarse en mecánica y astronomía. Lowell contrató a Slipher por un período corto y establecido; empleó a Slipher de mala gana, como favor hecho a regañadientes a uno de sus antiguos profesores. Sin embargo, la cosa no funcionó como Lowell planeaba. Slipher se marchó cincuenta y tres años más tarde, cuando se retiró del cargo de director del observatorio.

Aunque simpatizaba con la obsesión de su jefe, Slipher no estaba terriblemente interesado en la búsqueda de la civilización marciana. Se sentía más cautivado por la manera en que las bolas inanimadas de gas y polvo (las estrellas y los planetas) se movían por el universo. Uno de los mayores misterios a que se enfrentaban los astrónomos de la época era el enigma de las nebulosas espirales. Algunos pensaban que estos tenues resplandores en el cielo nocturno eran enormes agregados de estrellas («universos insulares», como las había descrito el filósofo Immanuel Kant). Otros creían que eran, simplemente, sistemas planetarios distantes. Resulta casi irónico que, al resolver esta cuestión, la investigación de Slipher nos condujera a preocuparnos de lo que no podemos ver, en lugar de a aquello que sí podemos ver.

En 1917, cuando Albert Einstein ponía los toques finales a su descripción de cómo se comporta el universo, necesitaba conocer un dato experimental para que todo encajara. La pregunta que planteó a los astrónomos de todo el mundo fue ésta: ¿Está el universo expandiéndose, contrayéndose o manteniéndose estacionario?

Las ecuaciones de Einstein describían de qué manera la forma del espacio-tiempo (las dimensiones del espacio y el tiempo que conjuntamente constituyen la trama del universo) se desarrollaría en función de la masa y la energía que contuviera. Originalmente, las ecuaciones hacían que el universo se expandiera o se contrajera bajo la influencia de la gravedad. Si el universo se mantenía estacionario, tendría que poner algo más en él: un término de *antigravedad* que pudiera empujar allí donde la gravedad ejerciera una atracción. No estaba muy contento de hacerlo; mientras que tenía sentido que masa y energía ejercieran una atracción gravitatoria, no existía una razón obvia por la que debiera existir una antigravedad.

Lamentablemente para Einstein, existía entre los astrónomos de la época un consenso acerca de que el universo se mantenía estacionario. Así, con abatimiento, añadió el término de la antigravedad para impedir que su universo se expandiera o

se contrajera. Se la denominó *constante cosmológica* (porque afectaba a los objetos a distancias cosmológicas, pero no a la escala cotidiana de los fenómenos en el seno de nuestro sistema solar), y fue introducida con muchas justificaciones. Esta constante, decía Einstein, «no está justificada por nuestro conocimiento actual de la gravitación». Estaba allí únicamente para hacer que las ecuaciones encajaran con los datos. ¡Qué lástima, pues, que nadie hubiera prestado atención a los resultados de Vesto Slipher!

Slipher había usado el telescopio Clark para medir si las nebulosas se movían en relación a la Tierra. Para ello utilizó un espectrógrafo, un instrumento que descompone la luz de los telescopios en sus colores constituyentes. Observando la luz procedente de las nebulosas espirales, Slipher se dio cuenta de que los diversos colores de la luz cambiaban en función de si la nebulosa se movía hacia la Tierra o se alejaba de ella. El color es nuestra manera de interpretar la frecuencia de la radiación (es decir, el número de ondas por segundo en ella). Cuando vemos un arco iris, lo que vemos es radiación de diferentes frecuencias. La luz violeta es una radiación de frecuencia relativamente alta, la roja es de una frecuencia inferior; todas las demás se encuentran en algún lugar entre estos dos extremos.

Sin embargo, si a esto se añade el movimiento, tenemos lo que se conoce como *efecto Doppler*: la frecuencia de la radiación parece cambiar, de la misma manera que la frecuencia (o tono) de la sirena de una ambulancia parece cambiar cuando pasa rápidamente junto a nosotros en la calle. Si un arco iris se moviera hacia nosotros a mucha velocidad, todos los colores virarían hacia el extremo azul del espectro; el número de ondas que nos alcanzaría cada segundo aumentaría mucho debido al movimiento de acercamiento del arco iris. A esto se le llama desplazamiento o corrimiento al azul. Si el arco iris se alejara de nosotros, el número de ondas que llegarían por segundo se reduciría y la frecuencia de la radiación viraría hacia el extremo rojo del espectro: un desplazamiento o corrimiento al rojo.

Lo mismo ocurre con la luz procedente de las nebulosas distantes. Si una nebulosa se desplazaba hacia el telescopio de Slipher, su luz se correría al azul. Las nebulosas que se alejaban

velozmente de la Tierra tendrían la luz desplazada al rojo. La magnitud del cambio de frecuencia da la velocidad.

En 1912 Slipher había completado cuatro espectrogramas. Tres estaban desplazados al rojo y uno (Andrómeda) al azul. Durante los dos años siguientes Slipher midió los movimientos de otras doce galaxias. Todas, excepto una, estaban desplazadas al rojo. Era un conjunto de resultados sorprendente; tan sorprendente, de hecho, que cuando los presentó en la reunión de la Sociedad Astronómica Americana de agosto de 1914, recibió una prolongada ovación.

Slipher es uno de los héroes olvidados de la astronomía.¹ Según la biografía que publicó de él la Academia Nacional de las Ciencias, «probablemente hizo más descubrimientos fundamentales que ningún otro astrónomo observador del siglo xx».² Pero, a pesar de todas sus contribuciones, obtuvo poca cosa más que el reconocimiento por dos mapas: uno de la Luna, y uno de Marte. Lejos, más allá del cielo, dos cráteres llevan su nombre.

La razón de este escaso reconocimiento es que Slipher tenía la costumbre de no comunicar realmente sus descubrimientos. A veces escribía un conciso artículo que difundía sus hallazgos; otras veces los comunicaba mediante cartas a otros astrónomos. Según su biografía, Slipher era «un hombre reservado, discreto y cauto que evitaba aparecer en público y que incluso rara vez asistía a las reuniones astronómicas». La aparición en agosto de 1914 fue una anomalía, a lo que parece. Pero dicha anomalía puso a un astrónomo inglés llamado Edwin Powell Hubble en la senda de la fama.

Stephen Hawking, el cosmólogo de la Universidad de Cambridge, hace una observación irónica en su libro *El universo en una cáscara de nuez*.³ Al comparar la cronología de las carreras respectivas de Slipher y Hubble, y al señalar que es a Hubble a quien se concede el mérito del descubrimiento, en 1929, de que el universo se expande, Hawking hace una referencia mordaz a la primera vez que Slipher discutió públicamente sus resultados. Cuando la audiencia se puso en pie para aplaudir los descubrimientos de Slipher en aquella reunión de la Sociedad Astronómica Americana de agosto de 1914, señala Hawking, «Hubble escuchó la presentación».

En 1917, cuando Einstein hacía su solicitud a los astrónomos para respaldar su concepción del universo, las observaciones espectrográficas de Slipher habían demostrado que, de veinticinco nebulosas, veintiuna se alejaban rápidamente de la Tierra, y sólo cuatro se acercaban a ella. Todas se desplazaban a velocidades asombrosas: de promedio, a más de 2 millones de kilómetros por hora. Esto fue una conmoción, porque la mayoría de estrellas en el firmamento no hacían tal cosa; en aquella época, se creía que la Vía Láctea era el universo completo, y las estrellas eran casi estáticas en relación a la Tierra. Slipher cambió todo esto, e hizo trizas nuestro universo. Las nebulosas, sugirió, son «sistemas estelares vistos a grandes distancias». Slipher había descubierto calladamente que el espacio estaba tachonado de miríadas de galaxias que se desviaban en la distancia.

Cuando estas medidas de la velocidad se publicaron en los *Proceedings of the American Philosophical Society*,⁴ nadie les hizo mucho caso, y Slipher no iba a ser tan vulgar como para buscar la atención para su obra. Pero era claro que Hubble no se había olvidado de ella. Le pidió los datos a Slipher para incluirlos en un libro sobre relatividad y, en 1922, Slipher le envió una tabla de velocidades de las nebulosas. En 1929 Hubble había reunido las observaciones de Slipher con las de algunos otros astrónomos (y las suyas), y había llegado a una conclusión notable.

Si se toman las galaxias que se alejan de la Tierra y se ponen en relación su velocidad con la distancia a la Tierra, se encuentra que cuanto más alejada se halla una galaxia, más celeridad se desplaza. Si una galaxia que retrocede se halla a una distancia de la Tierra que es el doble de la distancia a la que se encuentra otra, se moverá al doble de velocidad. Si se halla tres veces más lejos, su velocidad es tres veces mayor. Para Hubble, sólo había una explicación posible. Las galaxias eran como puntos de papel pegados a un globo; si éste se hincha, los puntos no crecen, pero se separan unos de otros. El espacio entre las galaxias estaba creciendo. Hubble había descubierto que el universo se expande.

Fue una época agitada. Con esta expansión, la idea de un gran estallido,* sugerido por primera vez en la década de 1920,

* *Big Bang.* (N. del t.)

burbujeó en la superficie de la cosmología. Si el universo se expandía, tuvo que haber sido antaño más pequeño y más denso; los astrónomos empezaron a preguntarse si éste era el estado en el que el cosmos había comenzado. El trabajo de Vesto Slipher había conducido a las primeras pruebas de nuestros orígenes fundamentales. Las mismas pruebas acabarían por aportarnos la revelación de que la mayor parte de nuestro universo es un misterio.

Para comprender cómo sabemos que falta un pedazo importante del cosmos, ate el lector un peso a un cordel largo. Extienda el cordel y haga girar el peso en un círculo. Al final del cordel largo, el peso se mueve con una relativa lentitud: se le puede ver sin que nos mareemos. A continuación, acortemos el cordel, de manera que el peso efectúe minúsculas órbitas alrededor de la cabeza del lector. Para hacer que siga girando en el aire, en lugar de que caiga y estrangule al lector, éste ha de hacerlo mover mucho más deprisa... tan deprisa que apenas se le puede ver.

El mismo principio opera en los movimientos de los planetas. La Tierra, en su posición cercana al Sol, se mueve mucho más rápidamente en su órbita que Neptuno, que está mucho más alejado. La razón es sencilla: se trata de equilibrar fuerzas. La atracción gravitatoria del Sol es más fuerte a la distancia radial de la Tierra con respecto al Sol que a la de Neptuno. Algo que tenga la masa de la Tierra ha de moverse relativamente deprisa para mantener su órbita. Para que Neptuno mantenga su órbita, con menos atracción del distante Sol, ha de ir más lentamente para mantener el equilibrio. Si se desplazara a la misma velocidad que la Tierra, saldría disparado y se alejaría de nuestro sistema solar.

Cualquier sistema orbital debería seguir esta regla: para que la atracción gravitatoria y las fuerzas centrífugas se equilibren se requiere que, cuanto más lejos se halle algo de lo que sea que lo mantiene en órbita, más lentamente se desplazará. Y, en 1933, esto es exactamente lo que un astrónomo suizo llamado Fritz Zwicky no vio.

Mientras empezaba la construcción del puente del Golden Gate y un Adolf Hitler de cuarenta y tres años era nombrado canciller de Alemania, Zwicky advirtió algo extraño acerca del grupo de galaxias Coma. Para decirlo de manera aproximada, las estrellas emiten una cierta cantidad de luz por kilo, de manera que, observando la cantidad de luz procedente del grupo Coma, Zwicky podía estimar cuánta materia contenía. El problema de Zwicky era que las estrellas de los límites de las galaxias se movían demasiado deprisa para resultar constreñidas por la atracción gravitatoria de esta cantidad de material. Según sus cálculos, la única explicación⁵ era que allí había unas cuatrocientas veces más masa en el grupo Coma de la que podía explicarse a partir de la materia visible del grupo.

Eso tendría que haber sido bastante para lanzarse a la búsqueda de la materia oscura, pero no lo fue... por la peor de las razones científicas. Si navega por Internet buscando referencias a Zwicky, el lector encontrará *brillante* junto a *disidente*, *genio* junto a *insufrible*. Al igual que ocurre con Slipher, no ocupa mucho espacio en los manuales de astronomía, a pesar de sus muchos e importantes descubrimientos. Fue el primero que vio que las galaxias forman grupos. Acuñó el término *supernova*. Era realmente especial. Por ejemplo, construyó una rampa de esquí cerca del Observatorio del Monte Wilson, en las montañas de San Gabriel, en California; en invierno, Zwicky iba a trabajar cargado con sus esquís, para practicar sus habilidades como saltador con esquís. Pero lo que necesitaba más atención eran sus capacidades interpersonales. Era un hombre espinoso, difícil, convencido de su propio genio y convencido de que nunca obtenía el reconocimiento que merecía. Tenía la tendencia a referirse a todos sus colegas como «sinvergüenzas esféricos»: sinvergüenzas desde cualquier lado que se les considerara. No es de extrañar, pues, que sus colegas hicieran oídos sordos a su descubrimiento de la masa que faltaba en el grupo de Coma.

Pero tenía razón. Hay algo acerca de la masa de las galaxias que simplemente no cuadra... a menos, claro, que el universo esté abundantemente salpicado de materia oscura. En 1939, en la inauguración del Observatorio McDonald en Texas, el astrónomo holandés Jan Oort añadió otras pruebas.⁶ Oort dio una

conferencia en la que demostró que la distribución de la masa en una determinada galaxia elíptica tenía que ser muy diferente de la distribución de la luz. Publicó los datos tres años después, destacando este punto en concreto en el resumen. De nuevo, en una respuesta kuhniana clásica, nadie reaccionó. Esta capacidad espectacular para ignorar tales resultados anómalos continuó durante décadas hasta que, por alguna razón, la gente finalmente escuchó a Vera Rubin.

Rubin, ahora en los últimos años setenta, hizo su primera gran aportación a la cosmología a los veintidós años. La edición del *Washington Post* de la víspera de Año Nuevo de 1950, informaba de una conferencia que dio en la Sociedad Astronómica Americana, destacando sus logros bajo el titular «Joven madre calcula el centro de la creación a partir de los movimientos de las estrellas». El texto acompañante describía el trabajo de Rubin como «tan atrevido... que la mayoría de astrónomos piensan que sus teorías todavía no son posibles». Pero su trabajo más atrevido, la lucha para que se tomara en serio la materia oscura, tenía que llegar todavía.

No es que Rubin se tomara muy en serio a sí misma, para empezar. La historia, dice, es una lección de lo muy tonto que puede ser un científico. En 1962, Rubin enseñaba en la Universidad de Georgetown, en Washington, D. C. La mayoría de sus alumnos procedían del Observatorio Naval de los Estados Unidos, que se encontraba al cabo de la calle, y eran astrónomos muy buenos, recuerda. Juntos pudieron cartografiar la *curva de rotación* de una galaxia. Es éste un gráfico que muestra de qué manera cambia la velocidad de las estrellas a medida que pasamos del centro de la galaxia al exterior de la misma. Al igual que aquel cordel con un peso que gira alrededor de la cabeza, las velocidades debieran reducirse a medida que nos alejamos del centro. Sin embargo, para Rubin y sus investigadores navales, no lo hacían; una vez que se apartaban del centro, la curva se aplanaba. Presentaron los resultados en una serie de tres artículos, y Rubin no sacó nada en claro de ellos.

Tres años más tarde, en 1965, se incorporó a la Institución Carnegie, de Washington. Después de un año en el despiadado trabajo de buscar cuásares, los objetos más distantes conocidos,

Rubin deseaba hacer algo menos competitivo, algo que pudiera hacer por sí misma. Decidió observar la parte externa de las galaxias porque nadie la había estudiado: todos se concentraban en los centros. Rubin no sólo había olvidado completamente su trabajo con los estudiantes del Observatorio Naval, sino que tampoco se creía sus propios resultados a medida que los iba reuniendo. Medía las velocidades observando cómo el movimiento había cambiado el espectro luminoso procedente de una estrella. Rubin reunía unos cuatro espectros cada noche, y se iba alejando gradualmente del centro de la galaxia. Aunque revelaba los espectros a medida que los obtenía, y todos parecían iguales, no consiguió descubrir nada.

«Siempre pensabas que el punto siguiente caería —dice—. Y sencillamente no lo hacía.»

Al final, sin embargo, se dio cuenta de ello. En 1970 Rubin había cartografiado la curva de rotación de Andrómeda; las velocidades de las estrellas eran las mismas con independencia de lo lejos que estuvieran. Si las velocidades de las estrellas permanecían elevadas en el borde, las fuerzas centrífugas tendrían que estar lanzando las estrellas exteriores de Andrómeda al espacio profundo. Por derecho, Andrómeda tendría que estar cayéndose a pedazos. A menos, claro, que esté rodeada de un halo de materia oscura.

Nadie sabe lo que es realmente la materia oscura. Cuando Malcolm Longair, profesor de Cambridge, escribió su manual de cosmología *La evolución de nuestro universo*, listó algunas de las cosas que podría ser que fuera.⁷ En los primeros puestos de la lista había cosas tales como planetas interestelares y estrellas de masa reducida. Hacia el final de la lista había ladrillos y ejemplares del *Astrophysical Journal*. Este último candidato parece de lo más apropiado; si se descubriera que ésta es la respuesta, ello añadiría una agradable ironía a la historia de la materia oscura. El *Astrophysical Journal* es donde, en 1970, Rubin publicó sus resultados⁸ y sacó la materia oscura del olvido.

Pero ello no se deducía necesariamente del artículo. El título parece inocuo: «Rotación de la nebulosa de Andróme-

da a partir de un seguimiento espectroscópico de regiones de emisión». El resumen, el sumario del artículo no parece decir nada polémico. Las conclusiones del artículo son igual de decepcionantes. Presenta los datos (medidas de las velocidades de rotación de las estrellas en Andrómeda) y no dice nada más. Sin embargo, el gráfico de la página 12 cuelga todavía de la pared del despacho de Rubin en el Departamento de Magnetismo Terrestre de la Institución Carnegie, de Washington, D. C. Y hoy en día sigue siendo tan relevante, y tan misterioso, como lo fue cuando se publicó.

La idea de una garra de materia invisible que retiene a las estrellas externas de Andrómeda no fue comprendida de inmediato, pero al menos esta vez no fue ignorada. En primer lugar, los astrónomos justificaron los oídos sordos que habían hecho al asunto durante treinta y siete años. Empezaron a construir sus propias curvas de rotación, por ejemplo, y aportaron explicaciones exóticas acerca de cómo la masa podía estar distribuida por las galaxias. Ninguno de estos esfuerzos convenció a Rubin, dice; de alguna manera, siempre había un par de puntos tan alejados de la curva (e ignorados) como para hacer que la idea fuera risible.

En la década de 1980, los astrónomos ya habían dejado de inventarse los datos. Había algo acerca de la gravitación de las galaxias que no encajaba, y la mejor explicación era la existencia de alguna materia que no brillaba como las estrellas, ni reflejaba la luz, ni emitía radiación detectable, ni se comportaba de ninguna manera que hiciera su presencia conocida, excepto por su atracción gravitatoria. Ahora los esfuerzos se dedicarían a encontrar qué era este extraño material.

La primera reunión sobre el tema de esta nueva materia oscura se tuvo en la Universidad de Harvard en 1980. Entonces Rubin proclamó confiadamente a la audiencia que en sólo una década sabríamos qué era la materia oscura. Este plazo llegó y pasó, y no sabíamos más que antes. En 1990, en una reunión en Washington, D. C., Martin Rees, el astrónomo real inglés, dijo a la audiencia que el misterio se resolvería en diez años. Después, en 1999, un año antes del plazo que él había impuesto en Washington, Rees concedió una extensión, al declarar: «[Soy]

optimista y creo que, si escribiera dentro de cinco años, podría informar qué es la materia oscura».⁹

Su optimismo no estaba justificado. Todavía no sabemos qué es la materia oscura. Se ha sugerido toda una serie de objetos exóticos, desde agujeros negros hasta partículas todavía no descubiertas con propiedades extraordinarias. Nada que cumpla los requisitos se ha descubierto todavía. Y no es por no haber buscado.

Buscar materia oscura no es cosa de pusilánimes; este material ha evitado la detección durante treinta años por buenas razones. No obstante, los científicos tienen algunas ideas acerca de cómo observarla. Los físicos tienen modelos para los tipos de partículas que pudieron haberse creado en el gran estallido y que todavía pudieran estar rondando por el cosmos para actuar como materia oscura. Su mejor conjetura es algo llamado partículas masivas de interacción débil, o WIMPs.* Si esto es cierto, no hay escasez de materia oscura que cazar. Según los físicos de partículas, ahora mismo la tierra está moviéndose a través de una neblina de materia oscura; algo así como mil millones de WIMPs están pasando a través de la cabeza del lector cada segundo.

Entre las WIMPs hay un candidato notable: el neutralino. Es lo bastante estable como para estar llenando todavía el cosmos 13.000 millones de años después del gran estallido. Sería convenientemente difícil de ver o sentir; no interactúa a través de la fuerza o interacción fuerte que mantiene a los núcleos unidos, e ignora los campos electromagnéticos y es ignorada por ellos. Es decisivo que tiene la masa suficiente (alrededor de cien veces la masa de un protón) para tener el efecto necesario sobre las galaxias. El único inconveniente es que nadie sabe si el neutralino existe realmente.

Si se quiere encontrar pruebas experimentales de la materia oscura, se ha de conseguir que interactúe con algo. Nuestra mejor oportunidad de ello es con átomos que tengan núcleos

* *Weakly Interacting Massive Particles. (N. del t.)*

grandes. Los cazadores de materia oscura utilizan grandes dispositivos de cristales de silicio o germanio, o enormes cubas de xenón líquido. La esperanza es que una de las WIMPs haga un impacto directo en uno de estos núcleos atómicos gordos. Si esto ocurre, el núcleo retrocederá un poco (en el caso de los cristales) o emitirá una señal eléctrica (del xenón líquido). Sin embargo, existe un par de complicaciones.

En primer lugar, los núcleos vibran naturalmente, de modo que los físicos necesitan mantenerlos quietos con el fin de evitar una detección falsa en el aparato. Por ejemplo, los conjuntos de cristales han de enfriarse hasta una fracción de grado por encima del cero absoluto, la temperatura a la que todo deja de moverse. Enfriar tanto los detectores es pesado y difícil. Y después está la segunda complicación: los rayos cósmicos.

La Tierra es bombardeada continuamente por partículas de alta velocidad procedentes del espacio, y estos rayos cósmicos producen exactamente la misma rúbrica que las WIMPs en un detector de WIMP. De modo que las investigaciones han de efectuarse bajo tierra, a gran profundidad, más allá del alcance de los rayos. Es una complicación que hace que los cazadores de materia oscura sean los habitantes de algunos de los laboratorios más inaccesibles de la Tierra. Un grupo italiano ha situado su detector bajo una montaña. En el Reino Unido, la búsqueda del neutralino tiene lugar a 1.100 metros bajo tierra, en una mina de potasa cuyos túneles llegan a situarse bajo el fondo marino. Los investigadores en los Estados Unidos han puesto en marcha una caza de la materia oscura a setecientos metros bajo tierra, en una mina de hierro abandonada en el norte de Minnesota.

Cuando se comprenden las condiciones de trabajo, se sabe que esta gente ha de ser seria. Y, sin embargo, hasta ahora no han encontrado nada en absoluto. Las investigaciones ya hace más de una década que duran; en realidad, muchos de estos investigadores han dedicado más de dos décadas de su vida a la búsqueda de materia oscura. Las mejoras hacen que el equipo sea cada vez más sensible, pero todavía no tenemos una idea defendible de qué es lo que causa esa extraña atracción en los cielos.

Parece algo imposible que, dado que este material constituye la cuarta parte del universo, no sepamos todavía lo que es. Pero quizá debería consolarnos el hecho de que al menos nos dimos cuenta de que faltaba. Si no lo hubiéramos hecho, es difícil imaginar lo equivocados que hubiéramos estado cuando, en 1997, resultó evidente que otro pedazo del universo estaba ausente y sin permiso. Si la materia oscura era un problema, el descubrimiento de la energía oscura fue una catástrofe.

Si el universo se está expandiendo, como Hubble demostró que hacía, hay dos preguntas que inmediatamente se nos ocurren. Primera, ¿con qué rapidez se expande? Segunda, ¿seguirá expandiéndose para siempre?

La respuesta a la primera pregunta se tiene al medir las velocidades de las galaxias que se alejan y sabiendo lo lejos que están. No se puede simplemente medir lo rápidamente que una galaxia se aleja de nosotros y llamar a eso la tasa de expansión del universo; la manera como se expande el espacio se interfiere con nuestro sentido común. Cuanto más lejos se halla de nosotros una galaxia, más rápidamente se aleja de nosotros porque el espacio que hay entre ella y la Tierra también se expande. El resultado, llamado *constante de Hubble*, da una medida de la tasa de expansión; en la actualidad, pensamos que es de unos setenta kilómetros por segundo por (aproximadamente) 3 millones de años luz. La precisión no debe tomarse demasiado seriamente; este valor está siempre sujeto a cambio cuando llegue un conjunto de medidas mejor.

Dar respuesta a la segunda pregunta es, en múltiples aspectos, mucho más interesante. Si el universo se expande todavía después del gran estallido, dicha expansión debiera ir disminuyendo la velocidad; la atracción mutua de toda la materia del universo opera en contra de cualquier expansión ulterior. De modo que nuestro futuro cósmico depende de cuánta materia haya allá afuera, y de cómo esté dispuesta.

Los cosmólogos ya saben algo acerca de estas preguntas a partir de una observación científica muy fácil: el hecho de que existimos. Para que esto haya ocurrido, el universo tuvo

que haberse expandido desde sus inicios calientes y densos con una determinada cantidad de energía. Si hubiera habido demasiada, cualquier materia que se hubiera creado se hubiera extendido de manera tan delgada que la gravedad no hubiera podido agregar los átomos en estrellas, galaxias y (finalmente) seres humanos. A medida que la materia se hubiera extendido más, su atracción gravitatoria se hubiera hecho más débil todavía y la energía de expansión aun más dominante. El universo hubiera reventado antes de que ocurriera nada interesante (los humanos, por ejemplo).

Por el contrario, si hubiera habido demasiado poca energía de expansión, la gravedad hubiera amontonado toda la materia en un ciclo de retroalimentación similar: una vez las cosas se hubieran acercado unas a otras, su atracción gravitatoria se hubiera hecho mayor, atrayéndolas más todavía. Finalmente, la trama del universo se habría encogido para implosionar en un supuesto teórico que los astrónomos llaman *gran colapso*.*

Dada una cantidad determinada de energía de expansión, producir un universo como el nuestro (del tipo de Ricitos de Oro:** uno que sea «exactamente adecuado») implica una distribución precisa de materia. Como abreviación para hablar de la densidad de la materia gravitatoria, los astrónomos se refieren al valor *omega* del universo. Un omega de 1, que corresponde a unos mezquinos seis átomos de hidrógeno por metro cúbico de universo (un metro cúbico de aire alrededor del lector tiene algo así como 10 millones de trillones de átomos),*** es donde la densidad de la materia equilibra más o menos la expansión.

Según la teoría, la existencia de estrellas y galaxias depende de que omega empiece con una parte en mil billones de 1. Y, debido a la naturaleza del ciclo de retroalimentación con omega, empezar en equilibrio significa permanecer en equilibrio. En la actualidad, si los teóricos están en lo cierto, omega debería hallarse todavía cerca de 1. El problema es que sabe-

* *Big Crunch*. (N. del t.)

** Personaje de «Ricitos de Oro y los tres osos», cuento popular infantil. (N. del t.)

*** 10^{25} átomos. (N. del t.)

mos que no hay suficiente materia (oscura o de otro tipo) para hacer que omega sea 1.

Es este problema el que condujo al retorno de la constante cosmológica de Einstein, algo que nadie vio venir. El descubrimiento triunfal por parte de Hubble de la expansión del universo había significado que la constante cosmológica podía abandonarse. Sencillamente, las ecuaciones de la relatividad general no necesitaban el factor inventado que producía un universo en estado estacionario, y ya en 1930 la antigraedad de Einstein resultaba embarazosamente redundante. ¿Quién podría haber imaginado que, casi setenta años después, estaría de vuelta, reencarnada en la forma fantasmagórica de la energía oscura?

Los astrónomos empezaron a investigar omega en la década de 1930, como una manera de predecir el destino del universo. Si omega es realmente 1, la expansión continuará a su tasa actual. Si los teóricos están equivocados, y omega es inferior a 1, la energía que hay detrás de la expansión aumentará a medida que la materia se haga menos densa. Si resulta que omega es mayor que 1, la gravedad acabará por ganar, y nuestro futuro será un gran colapso.

Inicialmente, los astrónomos investigaron omega continuando con los métodos de Slipher y Hubble: midiendo las propiedades de la luz procedente de las galaxias. Sin embargo, el enorme número de fuentes de luz de una galaxia significaba que esto nunca producía nada fiable; es algo así como intentar medir las propiedades del habla humana escuchando el ruido de una hinchada de fútbol. Lo que necesitaban era un único objeto, algo cuyas propiedades se pudieran medir y sacar inferencias de ellas. En 1987 encontraron uno. Si queremos comprender el destino del universo, resulta que tendremos que habérnoslas con estrellas que explotan: supernovas.

Hace siglos que estamos viendo supernovas en el cielo; el astrónomo danés Tycho Brahe informó de haber visto una en 1572, más de treinta años antes de la invención del telescopio. Se producen cuando una estrella se hace demasiado grande y se desploma bajo su misma gravedad. Durante las pocas semanas

o meses a lo largo de los cuales tiene lugar este desplome, que transforma la estrella en una estrella de neutrones o incluso en un agujero negro, brilla con la potencia de un billón de soles. El lunes, 23 de febrero de 1987, vimos un espectáculo de este tipo. La explosión de Sanduleak-69 202, una estrella gigante azul en la galaxia de la Nube Magallánica Grande, fue notable por dos razones. Primera, porque transformó esa estrella en la supernova más brillante que se había visto desde 1604. Segunda, porque su luz fue la primera en proporcionar un patrón para medir distancias cósmicas.

La manera en que determinadas supernovas (las que se conocen como supernovas de tipo 1a) emiten su luz tiene una característica peculiar que las hace de lo más atractivas para los astrónomos. Las supernovas de tipo 1a explotan porque han absorbido demasiado material de una estrella cercana. Si se analiza el espectro luminoso procedente de este tipo de explosión, y con qué rapidez su brillo se desvanece, nos dirá desde qué distancia la luz viajó hasta la Tierra, y de qué modo la expansión del espacio estiró la luz en su recorrido.

El único inconveniente es que tenemos una ventana de oportunidad limitada. Con las supernovas, la sincronización lo es todo. Si queremos obtener información útil, hemos de encontrarla durante las dos semanas siguientes al momento en que la luz llega por primera vez a la Tierra. Puesto que una explosión tiene lugar aproximadamente una vez por siglo en cada galaxia, esto significa que hemos de escudriñar muchísimas galaxias con nuestros telescopios.

Este tipo de trabajo servil es un problema para los astrónomos desde hace mucho tiempo. Dentro del Observatorio Lowell de Flagstaff, por ejemplo, se puede experimentar la naturaleza agónica de la astronomía en los tiempos de Slipher. Cuando dirigió la búsqueda de Plutón, la técnica utilizada fue una versión celeste de «Encuentre Vd. la diferencia». Se colocaban dos placas fotográficas de la misma región del cielo, tomadas en noches diferentes, en una máquina llamada comparador de destello, y después se observaban una tras otra las dos imágenes casi completamente parecidas. El ganador es el primero que advierte el único punto blanco (en el batiburrillo de puntos blancos) que se

ha movido. Este punto blanco que ha variado es el planeta que se está buscando.

Por suerte, en la exposición de Lowell, alguien marcó el punto desplazado con una gran flecha blanca. La moderna tecnología de lectura de imágenes ha hecho todavía más fácil el poder discernir la aparición de una supernova; hoy en día, tenemos ordenadores que proporcionan la gran flecha blanca. Pueden comparar dos fotografías diferentes del cielo, y después destacar las diferencias. Algunas de éstas corresponderán a asteroides, algunas serán las luminosidades diferentes asociadas con los agujeros negros en el centro de las galaxias; algunas serán señales falsas: destellos brillantes de partículas subatómicas que impactan sobre la atmósfera de la Tierra. Y, sólo ocasionalmente, alguna será una supernova distante.

Las primeras interpretaciones robustas de datos de supernovas llegaron en junio de 1996, procedentes de un equipo basado en el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (LBNL), de California. Este anuncio se hizo en una reunión de cosmología convocada para celebrar el 250 aniversario de la Universidad de Princeton, el hogar intelectual de adopción de Albert Einstein. Un lugar que resultó ser perfecto para iniciar la resurrección de su constante cosmológica.

Cuando los astrónomos se acercaron por primera vez a utilizar las supernovas para cartografiar la expansión del universo, estaban convencidos de que iban a encontrar una deceleración. Después de todo, la energía del gran estallido tenía que estar disminuyendo; la gravedad habría dominado y los frenos estarían puestos de manera firme. Pero resulta que el universo no es tan sencillo.

A primera vista, los resultados del LBNL confirmaron las sospechas. La luz de las supernovas sugería que la expansión del universo se estaba haciendo más lenta: la atracción gravitatoria del contenido del universo estaba decelerando el cosmos y situando ω alrededor de 1.

Pero fue un hallazgo controvertido. Toda la materia gravitatoria del universo (incluida la materia oscura), daba un ω de sólo 0,3. ¿Acaso todos habían subestimado la cantidad de materia oscura? Parecía poco probable; por aquel tiempo se

utilizaban varios métodos diferentes para determinar la masa de las galaxias, y cada uno de ellos mostraba que había significativamente más materia gravitatoria de la que podíamos ver, y cada uno daba aproximadamente los mismos números.

Si la materia oscura tenía un fundamento absolutamente sólido, ¿qué ocurría? Los cosmólogos Michael Turner y Lawrence Krauss participaban en la reunión de Princeton, y tenían una respuesta preparada. ¿Por qué no dejar la materia oscura en 0,3, pero dejar que alguna otra cosa supusiera el 0,7 que faltaba? En lugar de buscar una materia adicional, ¿por qué no suponer que realmente se trata de energía adicional? Volvamos a introducir la constante cosmológica de Einstein, dijeron.

Como es pertinente, el experimento venció a las especulaciones de los teóricos. Cuando Saul Perlmutter publicó los resultados de su grupo del LBNL, los datos de las supernovas indicaban que la materia gravitatoria podía explicar una buena parte de todo el omega. Nadie necesitaba introducir de nuevo la constante cosmológica; sólo hacía falta que alguien ajustara la discrepancia de la materia oscura. Tenía que haber más ahí afuera.

El contratiempo era que los resultados de Perlmutter planteaban problemas por sí mismos. Si se conoce la densidad de la materia del universo, la tasa actual de expansión (la constante de Hubble), y en qué medida la expansión del universo se está frenando, se puede calcular cuánto hace que empezó la expansión; la edad del universo, en otras palabras. Con un omega de 1 que se deba totalmente a la materia, la deceleración debida a los datos del Lawrence Berkeley situaba la edad del universo en no más de 8 mil millones de años de antigüedad. Lamentablemente, los astrónomos que habían analizado la luz procedente de las estrellas más antiguas del universo situaban *su* edad en unos 15 mil millones de años. No hace falta tener una mente adiestrada en Harvard para deducir que el universo no puede tener 8 mil millones de años si las estrellas tienen casi el doble de dicha edad. Si había un problema con que la constante cosmológica completara omega, también existía un problema con que el omega de 1 fuera debido a la materia. El único hecho fiable, según parecía, es que la materia oscura suponía el 0,3 de omega; todo lo demás estaba disponible.

No todos estaban decepcionados con este atolladero; Robert Kirshner, por lo menos, estaba bastante contento. El astrónomo de Harvard estaba preocupado¹⁰ porque sus propios resultados de supernovas iban llegando con demasiada lentitud para competir con el equipo del LBNL; porque su equipo había sido batido en toda regla. Pero parecía que la carrera para comprender el destino del universo estaba todavía abierta.

En su libro *El universo extravagante*, Kirshner cuenta la historia que hay detrás de la búsqueda de supernovas y la rehabilitación de la constante cosmológica de Einstein con gran claridad y gracia. Al final, fue él quién volvió las tornas y fue el primero en dar con el resultado que definió una nueva era de la cosmología. Pero sólo después de haber derrotado sus propios prejuicios.

El equipo de Kirshner, compuesto por un puñado de investigadores de todo el mundo, utilizaba las observaciones de supernovas a partir de telescopios situados en la cumbre de montañas en Chile, Arizona y Hawái. Como el grupo del LBNL, buscaban nuevas supernovas, mes tras mes, luego hacían el seguimiento de cualesquiera candidatos prometedores haciéndose cargo del Telescopio Espacial Hubble para efectuar algunas observaciones detalladas. El Hubble podía desmenuzar la información sobre la distancia a la Tierra de una supernova y acerca de cómo variaba el espectro de su luz a medida que la explosión seguía su marcha.

Al final, tuvieron lo que necesitaban. Y no les gustó nada.

Las explosiones distantes eran más débiles de lo que tenían que haber sido: la luz tenía que viajar a mayor distancia que la que debía. Fue Adam Riess, un astrónomo del equipo de Kirshner con base en Berkeley, el primero que lo dijo en voz alta: los datos indicaban una aceleración. La expansión del universo se aceleraba.

Era imposible. Pero inténtese decirle eso a las supernovas. Cada vez que Riess utilizaba los datos de las supernovas (la luminosidad, el corrimiento al rojo y el desvanecimiento con el tiempo) para obtener un valor de omega, sus cálculos le decían que el universo contenía una cantidad negativa de masa. La única manera de que ello tuviera sentido era suponer que la masa

no era la única fuerza que operaba en la expansión del universo. Si se añadía una constante cosmológica, todo tenía sentido. Ante la elección entre invocar una masa negativa y resucitar la constante cosmológica de Einstein, abandonada desde hacía tiempo, ganó la constante. Pero por muy poco.

En enero de 1998 resultaba claro a partir de presentaciones en congresos que los datos del equipo del LBNL señalaban ahora también en la misma dirección; habían vuelto a definir su análisis, ajustando problemas tales como de qué modo tener en cuenta la manera en que el polvo interestelar afectaría a las observaciones. El caso era que nadie quería equivocarse. Anunciar el retorno de la constante cosmológica de Einstein se convirtió en una guerra de nervios, una prueba de la fe de cada equipo en sus capacidades experimentales. ¿Hacer público el anuncio, o esperar un poco, hacer unas cuantas pruebas más, analizar de nuevo para hallar posibles errores en la manipulación de los datos? El premio era ser el primero en producir el resultado científico de la década. El riesgo, compartir el huevo lanzado a la cara de Einstein.

A Kirshner no le gustaba el resultado, y ciertamente no quería probar huevo alguno. Admite que hizo todo lo posible para evitarlo. El 12 de enero de 1998, le envió a Riess por correo electrónico un consejo: «En el fondo, sabes que esto es erróneo», escribió.

Riess le respondió aquella noche con un largo mensaje electrónico al equipo. Su respuesta suena casi shakesperiana, como algo que Enrique V podría haber dicho si hubiera sido astrofísico: «Abordad estos resultados no con vuestro corazón ni con vuestra cabeza, sino con vuestros ojos —escribió—. ¡Al fin y al cabo, somos observadores!».

A finales de febrero, anunciaron los resultados. Hubo una tormenta mediática. Riess informó de forma elocuente a la audiencia de la CNN que la expansión del universo se aceleraba, que el cosmos estaba explotando literalmente... y que la constante cosmológica de Einstein había retornado, abriéndose camino por la trama del universo. Kirshner hizo una breve declaración muy poco shakesperiana, que apareció en el *Washington Post* del 27 de febrero: «Parece cosa de locos —admitió—.¹¹ Pero es la explicación más sencilla».

Incluso entonces no estaban muy contentos con la explicación. El jefe del equipo, Brian Schmidt, fue probablemente quien mejor lo planteó. Su reacción, le contó a la revista *Science*, se hallaba «a medio camino entre el asombro y el horror».¹²

No obstante, el LBNL llegó a las mismas conclusiones poco después. Los resultados todavía aguantan. ¿Y qué es lo que está separando el universo? Sencillamente, no lo sabemos. Pero también está tirando de todos los hilos de la investigación fundamental en física.

El asombro y el horror de Brian Schmidt apenas habían empezado a sondear las profundidades de asombro y horror que iban a seguir al anuncio de su equipo. Ya no se trata simplemente de un misterio cosmológico. La observación de que «parecía cosa de locos», basada en la luz emitida por una serie de estrellas que explotaban, creó desavenencias entre algunos de los más eminentes científicos del planeta. Ahora que la constante cosmológica entra en juego de nuevo, nadie puede ponerse de acuerdo acerca de la mejor manera de proceder. Paul Steinhardt, un teórico de la Universidad de Princeton en Nueva Jersey, expresó su consternación de que, gracias al «problema de la constante cosmológica», muchas de nuestras mentes más brillantes parecen haber desistido de llegar a comprender nunca nuestro universo. «Estoy decepcionado con lo que la mayoría de teóricos están dispuestos a aceptar», dijo a la revista *Nature* en julio de 2007.¹³

La controversia es, de manera bastante literal, mucho ruido para nada. La «nada» en cuestión es el espacio «vacío» del universo que, en realidad, está lejos de hallarse vacío.

El cosmos, con independencia de que contenga o no materia, chisporrotea de energía. En la década de 1920, poco después del nacimiento de la teoría cuántica, que describe de qué manera se comporta la naturaleza a la escala de los átomos y de las partículas subatómicas, el físico inglés Paul Dirac la usó para producir una versión cuántica de la teoría que hay detrás de las características de los campos eléctricos y magnéticos. La *teoría cuántica de campos* de Dirac condujo finalmente a la predicción de que el espacio vacío posee energía. Puesto que los físicos se

refieren al espacio vacío como *el vacío*, la energía de Dirac ha terminado por conocerse como la *energía del vacío*.

Según nuestra mejor conjetura, esta energía del vacío ha de ser lo que confiere potencia a esta aceleración de «antigravedad» que las supernovas han puesto al descubierto; la energía del vacío es la constante cosmológica. El problema es que las mediciones de las supernovas nos dicen que la energía del vacío es minúscula. Por lo general se mide en gramos. (Recuerde el lector que, según la famosa ecuación de Einstein, $E = mc^2$, masa y energía son interconvertibles.) La cantidad de vacío desplazado por el volumen de la Tierra en el espacio contendría aproximadamente la centésima parte de un gramo de energía del vacío. Es así de pequeña.

Sin embargo, cuando los teóricos calculan la energía del vacío a partir de la teoría cuántica de campos, obtienen un número que es demasiado grande. Imponentemente grande. Su teoría sugiere que la energía del vacío es tan grande que ya tendría que haber reventado el universo en una enorme hiperaceleración. Éste es el llamado problema de la constante cosmológica, y se acepta (incluso por los físicos implicados) como *el* desajuste más embarazoso que ha existido nunca entre la teoría y el experimento. Un millón es un número grande: un 1 seguido de 6 ceros. Un billón tiene 12 ceros. El desajuste entre el valor medido y el teórico de la constante cosmológica tiene 120 ceros. Ciento veinte.

Ante este fracaso, muchos físicos han adoptado una idea que planteó por primera vez el premio Nobel Steven Weinberg en 1987. En su libro *El sueño de una teoría final*,¹⁴ Weinberg sugirió que en nuestro universo podía existir una constante cosmológica sin que fuéramos capaces de explicar su valor. Si el nuestro fuera sólo un universo entre muchos, cada uno podría tener valores diferentes para sus constantes. Algunos de dichos universos serían sin duda estériles, pero algunos conducirían a la producción de vida; probablemente habría al menos uno en el que evolucionaran seres como los humanos. Éste es el enfoque del *paisaje antrópico* para explicar la naturaleza del universo (*antrópico* significa «de los humanos»). Dicho enfoque, cuando se resume, dice esencialmente que nuestro universo es como es porque de otro modo no podríamos estar aquí para observarlo.

No implica necesariamente un diseñador ni ninguna intención; simplemente significa que si las condiciones fueran diferentes, nadie estaría allí para observarlas. Esencialmente, dice que el hecho mismo de que observemos el universo limita la gama de formas que puede tomar. El término «paisaje» procede de la afirmación de los físicos de que nuestro universo está compuesto de un terreno enormemente variado, un cobertor hecho de retacitos de subuniversos, cada uno con sus propiedades únicas y asignadas aleatoriamente. No es necesario que haya explicaciones para los valores de las constantes en cada uno de ellos.

Como «explicación» para el valor de la constante cosmológica, para muchos físicos esto es abominable. La sugerencia de Weinberg es, según Leonard Susskind, físico de la Universidad de Stanford, «impensable, posiblemente el reconocimiento más sorprendente que puede hacer un científico moderno».¹⁵

La idea es tan desagradable porque pone a la ciencia patas arriba. El filósofo Karl Popper dijo que la ciencia avanza únicamente mediante falsación: alguien lanza una hipótesis, y a continuación todos pueden utilizar datos experimentales para intentar derribarla. Si los datos falsan la hipótesis, pasamos a la siguiente. Sólo cuando se tiene una hipótesis que ha sobrevivido muchos disparos puede uno empezar a depositar una cierta fe en lo que dice.

Con el paisaje antrópico, esta aproximación no funciona porque los otros universos están fuera del alcance. No se puede falsar la idea porque nunca se puede probar con datos experimentales. Ya no explicamos por qué el universo es como es; en cambio, el universo es como es porque esto lo hace el tipo de universo en el que podemos habitar. ¿Es esto ciencia? Bien pudiera serlo, dice Susskind; piensa que probablemente Weinberg está en lo cierto. Si hemos de avanzar en nuestro conocimiento del universo, puede que ahora tengamos que desechar a Karl Popper y sus defensores (Susskind los llama *popperazzi*)* como los árbitros últimos de lo que la ciencia es y no es.¹⁶ Quizá simplemente debiéramos aceptar que, por mucho que ello irrite a los *popperazzi*, las leyes de nuestro universo pueden ser como son debido a nuestra propia existencia.

* De *papparazzi*, fotógrafo de celebridades para los medios. (N. del t.)

Por difícil que sea de tragar esta idea, hay razones para tomarla en serio. La teoría cuántica de campos sugiere que, si hemos de utilizar una constante cosmológica para completar nuestra descripción del universo, nuestro universo debiera ser realmente uno de muchísimos. Quizá es que, como una vez escribiera E. E. Cummings, «existe un universo bueno y tremendo en la puerta de al lado».

En la base de esta discusión está el *principio de incertidumbre* de la teoría cuántica, que dice que las propiedades fundamentales de cualquier sistema nunca están definidas de manera exacta, sino que poseen una borrosidad intrínseca. El principio de incertidumbre, cuando se aplica a la teoría cuántica de campos, produce fluctuaciones naturales en las propiedades de determinadas regiones del universo. Es algo así como tener una pelota que está acribillada de puntos débiles; a medida que el universo se hincha, estas fluctuaciones pueden aumentar, produciendo una nueva región de espacio y tiempo. En otras palabras, un universo que contenga una constante cosmológica que surja de la energía del vacío producirá continuamente nuevos universos burbuja. A su vez, estas burbujas producirán sus nuevos universos bebé... y así sucesivamente, *ad infinitum*. Lo que pensamos que es el universo es sólo una región del espacio-tiempo en un mar espumante de miniuniversos.

En la actualidad, la idea del paisaje antrópico tiene muchos defensores, especialmente entre los teóricos; ésta es la razón por la que Steinhardt se sitúa en la minoría. Pero si no podemos acceder a estos universos burbuja para ver si tienen constantes diferentes, ¿no estamos realmente dándonos por vencidos en la física?

Ésta fue la raíz de la discusión en Bruselas, en la que el fantasma de Albert Einstein nos miraba por encima del hombro. ¿Deberíamos encogernos de hombros y rebajar el valor de la constante cosmológica hasta el tipo concreto de universo en el que vivimos? ¿Podemos enfrentarnos a la idea de que quizá nunca comprenderemos qué es la mayor parte del universo, que quizá nunca lleguemos a la raíz de la energía oscura? La respuesta era doble, sí y no: sí, es una posibilidad a la que debemos enfrentarnos; no, ello no significa que perdamos la esperanza de una explicación. David Gross, que presidía el congreso, no

tardó en señalar que en la primera conferencia Solvay de 1911 los físicos se hallaban igualmente desconcertados.¹⁷ Se había demostrado que algunos materiales emitían partículas y radiación de una manera que parecía violar las leyes de conservación de la masa y la energía. La explicación llegó unos años más tarde, cuando se desarrolló la teoría cuántica. «Se les escapaba algo absolutamente fundamental», dijo Gross a la asamblea Solvay de 2005. «Quizá se nos escape algo tan profundo como a ellos entonces.»

Así, pues, ¿qué es este «algo fundamental»? ¿Tenemos alguna pista? La respuesta depende de a quién preguntemos. Adam Riess, la persona cuya retórica radical y shakesperiana nos atrajo a la era de la energía oscura, ofrece una sugerencia provocativa. ¿Qué ocurriría, dice, si no supiéramos lo bastante acerca de cómo funciona la gravedad? Quizá no haya ninguna materia oscura, y quizá no exista ninguna energía oscura. Quizá durante los últimos cuatro siglos hemos estado todos ciegos a minúsculas inexactitudes de la ley de la gravitación de Newton, y dichas inexactitudes constituyen la clave para restaurar el universo perdido.

Riess no es el primero en plantear la idea, y no dice que necesariamente tenga algún mérito. Su argumento es que es una posibilidad, y que todavía ha de descartarse. Vera Rubin cree lo mismo. Considera que noventa y nueve físicos de cada cien creen todavía en la existencia de algún material oscuro que llena el universo, y que su influencia gravitatoria mantiene unidas a las galaxias. Pero, según ella, cambiar los fundamentos de la física empieza a parecer una opción mejor.

A primera vista, el arreglo puede ser relativamente simple. Lo sugirió por vez primera en 1981 un físico israelí llamado Mordehai Milgrom. Básicamente, se modifica ligeramente la ley de la gravitación de Newton de manera que a grandes distancias, el tipo de distancias que se extienden a través de galaxias e incluso grupos de galaxias, la gravedad es un poco más fuerte de lo que de otro modo cabría esperar. La idea se conoce como *dinámica newtoniana modificada*, o *MOND*,*

* *Modified Newtonian Dynamics. (N. del t.)*

y, a pesar de su naturaleza aparentemente inocua, ha causado muchos problemas.

Tomar algo que ha funcionado perfectamente bien durante cuatrocientos años, algo que fue creado por un hombre generalmente considerado como el mayor científico de todos los tiempos, y sugerir que necesita una pequeña modificación, es una jugada valiente. Milgrom no fue tomado en serio la primera vez que lo sugirió. Pero consiguió algunos adeptos. El más notable de ellos era un joven astrónomo llamado Stacy McGaugh.

McGaugh se ha mostrado tan combativo en defensa de la MOND que tendría que salir a la calle provisto de un chaleco de kevlar. Si la manera como el problema de la materia oscura se pasó por alto durante cuarenta años enseñó a Vera Rubin lo estúpidos que pueden ser los científicos, McGaugh, que fue uno de sus estudiantes graduados, le enseñó algo más: lo resistente al cambio que es la ciencia.

En marzo de 1999, McGaugh dio una conferencia sobre la MOND en el Instituto Max Planck, en Alemania. Nadie allí estaba dispuesto a aceptar la idea. Si quiere usted que le tomemos en serio, le dijeron, prediga algo; cuando se confirme mediante experimento, le escucharemos.

Unos meses después, McGaugh publicó un artículo en el *Astrophysical Journal* que planteaba la descarada pregunta: «¿Y si no hay materia oscura?». ¹⁸ El resultado, dijo, sería que un rasgo característico de la radiación cósmica de fondo de microondas, el eco del gran estallido, sería diferente de lo que los defensores de la materia oscura esperaban. El *espectro energético*, una especie de descomposición de la radiación, lo mostraría. Tanto el modelo de la MOND como el de la materia oscura predecían que el espectro energético tomaría la forma de una serie de picos y valles. La teoría de la materia oscura decía que el segundo pico sería ligeramente más bajo que el primero, pero no de manera significativa. Sin materia oscura, el segundo pico sería minúsculo, señalaba McGaugh; veamos qué ocurre cuando lleguen los datos.

El artículo de McGaugh se publicó a finales de 1999. En el verano de 2000, Rubin estaba en un congreso en Roma, vién-

dolo mientras daba una conferencia basada en su artículo a una audiencia de astrónomos. Ahora había datos. Y no había segundo pico. Ninguno en absoluto.

A McGaugh se le había concedido un espacio de diez minutos. Rubin observó asombrada que, cuando McGaugh terminó su comunicación, no ocurrió nada. «Después no hubo ni una sola pregunta —recuerda—. Más aún, a la mañana siguiente algún cosmólogo eminente inició la discusión de los nuevos resultados sin una sola mención al hecho de que eran diferentes del modelo de la materia oscura aceptado.»

Desde aquel momento, Rubin quedó impresionada por la MOND. En parte debido a que no le gusta la idea de invocar nuevas partículas exóticas para explicar una observación clara, y en parte porque la astronomía establecida ha sido demasiado buena en las relaciones públicas, y éstas, dice, suprimen el debate científico adecuado. Rubin ha sido siempre partidaria de los desvalidos en ciencia.

Durante mucho tiempo, la MOND ni siquiera era un desvalido. Como McGaugh puede atestiguar, era más bien como un perro* sarnoso tendido fuera de la sala de conferencias: una idea ad hoc remendada por un físico israelí sin una razón fundamental mejor para modificar la gravedad que la que tenía la mayoría para invocar la materia oscura. Pero entonces, en 2004, Jacob Bekenstein se implicó en el tema.

Bekenstein nació en Ciudad de México, estudió física en el Instituto Politécnico de Brooklyn y en la Universidad de Princeton y ahora es profesor en la Universidad Hebrea de Jerusalén. Siendo joven, despertó el interés de Stephen Hawking cuando hizo varias propuestas polémicas sobre los agujeros negros (todas las cuales resultaron correctas); ahora simplemente se le considera una de nuestras mentes más formidables. Tan pronto como Bekenstein desarrolló una versión de la relatividad de Einstein adaptada específicamente para demostrar por qué ten-

* Doble sentido intraducible: *underdog* es aquel (no necesariamente un perro) que se espera que pierda, que no es el favorito; aquí se ha traducido por desvalido. Con la referencia al perro sarnoso, el autor refuerza su analogía. (N. del t.)

dría que tomarse en serio la MOND,¹⁹ el mundo de la física no tuvo otra elección que sentarse y escuchar. Cuando la MOND relativista de Bekenstein empezó a encajar de manera precisa con otras observaciones de las galaxias, lo que antes había sido una idea marginal, de repente tuvo que tomarse en serio. Y cuando defensores de toda la vida de la materia oscura empezaron a cambiar de bando, las cosas empezaron a ponerse feas.

A veces, la idea de que la ciencia es una disciplina neutra, meticulosa, que evita los prejuicios, tiene un mal día. Uno de tales días fue el 21 de agosto de 2006, cuando un comunicado de prensa de la NASA se jactaba: «La NASA encuentra pruebas directas de la materia oscura».²⁰

La jactancia se refería a observaciones de una colisión masiva entre dos grupos de galaxias, conocidas colectivamente como Cúmulo Bala. Al observar el resultado de la colisión, los astrónomos habían observado que había materia oscura que se había separado de la materia normal. Esto lo infirieron a partir de la manera en que la luz se desviaba al pasar por un área del espacio aparentemente vacía. Uno de los grandes éxitos de Einstein fue demostrar que la masa y la energía distorsionan la trama misma del universo. Cualquier radiación (ya se trate de luz o de rayos X) que viaja a través del espacio salpicado de estrellas enormes y planetas seguirá por lo tanto una trayectoria curva en lugar de una rectilínea. De modo que cuando el telescopio Chandra de la NASA registró luz que se desviaba al pasar por espacio vacío, sin materia visible en las cercanías, ello pareció como un espaldarazo para la materia oscura y un golpe en el ojo a los alborotadores que afirmaban que no hay necesidad de invocar la materia oscura, el polvo de duendes o el manjar blanco espacial y mágico (como un satírico decidió llamarlo) para explicar el universo.

El comunicado de prensa planteó de forma majestuosa el caso establecido. «Un universo dominado por material oscuro parece absurdo, de modo que queríamos comprobar si había algunos fallos básicos en nuestro razonamiento —dijo Doug Clowe, de la Universidad de Arizona en Tucson, y director del estudio—. Estos resultados son prueba directa de que la materia oscura existe.»

Excepto que no lo son, exactamente. Son, según admite posteriormente el comunicado de prensa, «la mayor evidencia hasta el momento de que la mayor parte de la materia del universo es oscura».

El comunicado seguía jadeando que algunos habían tenido la osadía de dudar de la existencia de la materia oscura. A lo que parecía, ya no podrían seguir haciéndolo. «A pesar de pruebas considerables de la materia oscura, algunos científicos han propuesto teorías alternativas para la gravedad allí donde es mayor a escalas intergalácticas que lo que predijeron Newton y Einstein, eliminando la necesidad de la materia oscura. Sin embargo, dichas teorías no pueden explicar los efectos observados de esta colisión.»

Se habían terminado las teorías de la gravedad modificada, pensará el lector. Excepto que parecía que nadie le había preguntado realmente a la gente de la gravedad modificada si sus teorías podían o no podían explicar los efectos observados de la colisión. En realidad, nadie había siquiera comprobado el archivo de artículos en el que los físicos cuelgan de manera rutinaria sus últimos resultados y teorías.

Dos meses antes del anuncio triunfal de la NASA, investigadores que estudiaban la teoría de la MOND relativista de Bekestein habían echado un vistazo al Cúmulo Bala. Su artículo, que titularon en broma «¿Puede la MOND recibir una Bala?» y que publicaron en una revista de astronomía respetada y con revisión por iguales, resulta de lectura interesante. No había nada en las observaciones del Chandra que contradijera la MOND relativista, aducía.²¹ La reacción de Milgrom fue también intrigante. «Hace tres años ya oímos las mismas afirmaciones», dijo; la comunidad de la MOND ha tenido mucho tiempo para digerir el asunto, para discutirlo en congresos, y para dejar que los autores sepan cómo la MOND lo explica, «pero no parecen escuchar». En opinión de McGaugh, el Cúmulo Bala es difícil de explicar por la MOND a menos que se invoque alguna materia invisible, pero no hay necesidad de nada exótico. La presencia de algunos neutrinos (que se sabe que existen, son difíciles de detectar y constituyen una pequeña fracción de la materia oscura en la teoría estándar) podría ser suficiente para explicar

las observaciones. Además, señala McGaugh, sabemos que los tipos de partículas de que estamos hechos (se denominan *bariones*) constituyen el 4 por ciento del cosmos, pero sólo hemos detectado directamente la décima parte de los bariones que se sabe que existen. ¿Acaso estos «bariones oscuros» están implicados en el Cúmulo Bala?

La MOND, acompañada de neutrinos y bariones oscuros, ni siquiera era la única alternativa. Nueve días después de la conferencia de prensa de la NASA, el físico canadiense John Moffat colgó su respuesta en el archivo. Dijo que su teoría modificada de la gravedad²² podía explicar también las observaciones del Chandra sin necesidad de invocar materia oscura alguna.

Moffat es un científico de lo más raro: es autodidacta, se marchó de París como artista en la miseria y, sin embargo, ha alcanzado posiciones académicas de responsabilidad. Su historia parece un cuento de hadas: En 1953, cuando tenía veinte años, le escribió una carta a Albert Einstein, interpretando algunas implicaciones de las ideas del gran hombre. Einstein le respondió, impresionado con la obra y el discernimiento de Moffat, y empezó a abrir puertas para el joven. En 1958 Moffat ya tenía un doctorado del Trinity College, de Cambridge... sin haber obtenido el grado de licenciatura.

Pero la suerte no ha estado siempre al lado de Moffat. Su genio poco convencional le llevó a trabajar en ideas que no estaban de moda, y en ciencia la moda es importante. Tuvo su idea principal (que la velocidad de la luz pudo haber sido distinta en el pasado) aproximadamente una década antes de tiempo. Aunque Moffat sólo consiguió publicarla en una revista oscura a principios de la década de 1990, la idea apareció en el primer plano de la física diez años después. Incluso entonces, Moffat tuvo que armar bronca antes de obtener el reconocimiento adecuado.

Y todavía la está armando, pero ahora en el ámbito de la materia oscura. La explicación de Moffat para las curvas de rotación planas de las galaxias se llama, de manera poco elegante,* pero al menos nada pretenciosa, MOG. Es decir, *gravedad modificada*. Pero, según Moffat, el ligero ajuste de la MOG a la gravedad

* Mog es en lenguaje vulgar marcharse, andar lentamente. (N. del t.)

newtoniana, que la hace algo más potente que lo normal a grandes distancias, explica las observaciones del Chandra.

Quizá la materia oscura esté ahí; quizá no. Existen alternativas, y cualquier observador neutral ha de decir que el asunto de la materia oscura no se ha resuelto todavía. Hasta ahora, hemos aguardado más de sesenta años para descubrir qué es lo que causa estas extrañas rotaciones galácticas, y es posible que nadie de los que vivimos en la actualidad encuentre nunca la verdad acerca de la materia oscura. Quizá la sepamos mañana. Hasta que lo hagamos, sin embargo, tal como señaló Adam Riess, no podemos estar seguros acerca de la energía oscura.

Y no es que los investigadores de la energía oscura estén matando el tiempo sin hacer nada. La NASA, la Fundación Nacional de Ciencia y el Departamento de Energía de los Estados Unidos han encargado a un grupo de físicos que encuentren la mejor manera avanzada de explorar el enigma de la energía oscura, y en septiembre de 2006 el Grupo de Trabajo de la Energía Oscura emitió su informe.²³ La mayoría de sus conclusiones recomendaban un «programa agresivo» de experimentos y observaciones astronómicas que nos ayudarán a verle el sentido a todo esto. Sin embargo, lo que es más intrigante, es que, además de todas las recomendaciones del programa, el presidente del grupo de trabajo recomendó discretamente otra manera de abordar el tema de la energía oscura. Lo que necesitamos realmente, dice Edward «Rocky» Kolb, es otro Einstein.

Kolb sugería que la energía oscura podía resolverse haciendo retroceder la física ochenta y cinco años. Parte del problema, dice, pueden ser las suposiciones que los teóricos hicieron en la década de 1920 con el fin de encontrar soluciones a las ecuaciones de Einstein (las soluciones son, esencialmente, descripciones matemáticas del universo). Supusieron que el universo era *isótopo*, es decir, muy parecido se mirara donde se mirara.

Si no es una idea muy peculiar, imagine el lector que se encuentra dentro de un pastel de arándanos y mira en todas direcciones. Los arándanos le rodean a derecha, izquierda, arriba y abajo; mire donde mire, no hay una diferencia apreciable

en la manera en que están distribuidos en todo el pastel. Nuestra visión desde el interior del universo parece ser la misma. Claro, si miramos en una dirección en el sistema solar o en la Vía Láctea, veremos ciertos rasgos familiares que no están allí si miramos en otra dirección. Pero cuando ojeamos más allá de nuestra región local, el universo parece el mismo donde sea que miremos.

Pero ¿lo es? No lo sabemos con seguridad. Se rumorea entre los astrónomos que las medidas de la radiación cósmica de fondo de microondas, el eco del gran estallido, muestran indicios de que el universo no es isótropo,²⁴ y algunos cosmólogos sugieren que hay buenas razones para considerar hacer revivir un concepto que se desechó a finales del siglo XIX: el *éter*, una entidad espectral que facilita que la luz y las partículas se desplacen a través del universo en una dirección en lugar de hacerlo en otra. Cualquiera de estas situaciones hipotéticas invalidaría la suposición de isotropía. Por el momento, no tenemos la información suficiente para saber nada de forma segura, pero es claro que, para acercarnos a la verdad sobre el universo que falta, lo que necesitamos realmente es una teoría que no haga esta conjetura. Sólo con dicha teoría en su lugar apropiado podemos estar seguros de que no hemos incurrido en error.

Es más fácil decirlo que hacerlo. Para decirlo de forma directa, no somos lo bastante listos para describir el universo sin hacer estos supuestos simplificadores (y posiblemente catastróficos). No es un rompecabezas imposible, hasta donde sabemos. Es simplemente que nos falta la intuición necesaria: todavía no podemos hacer los cálculos matemáticos. Somos como la generación anterior a Einstein. Pero un día, dice Kolb, alguien descubrirá cómo resolver las ecuaciones de Einstein sin las hipótesis invalidantes de la isotropía, y entonces dicha persona podrá producir algo interesante, algo como una explicación para la energía oscura. Aquel día, la inaccesibilidad del paisaje del universo (si acaso tal cosa existe) ya no tendrá ninguna importancia en nuestra comprensión del cosmos.

Ciertamente, es algo que hay que esperar con interés. Sin embargo, por el momento, todo lo que podemos hacer es ser conservador como Slipher y declarar con confianza que hay más cosas en el universo que las que ahora conocemos. El cosmos está todavía dispuesto para la investigación.

¿Quién sabe qué sorpresas nos tiene reservadas? Especialmente puesto que la energía oscura y la materia oscura no son las únicas indicaciones de que ahí afuera hay cosas a la espera de que se las pueda incorporar al canon de la física. Por ejemplo, hay razones para dudar de que lo que llamamos leyes de la física sean necesariamente de aplicación a todo el universo, o que fueran aplicables en todos los momentos de su historia. A buen seguro, esto cambiaría nuestra concepción de la evolución del universo. Pero antes de desviarnos por esta senda hemos de examinar la historia de dos naves espaciales, lanzadas en la década de 1970. Ahora están abandonando nuestro sistema solar... pero en una dirección ligera y misteriosamente distinta de aquella para la que fueron programadas. Quizá la anomalía de las *Pioneer* pueda decirnos qué es lo que está mal con nuestro cosmos.

Notas

1. En la reunión 207.^a de la Sociedad Astronómica Americana, del 8-12 de enero de 2006. Joseph Tenn, un profesor de Sonoma, dictó una conferencia titulada «¿Por qué se ha tenido tan poco en cuenta a V. M. Slipher?». Véase asimismo la página web de John Peacock, profesor de cosmología del Observatorio Real de Edimburgo, en <http://www.roe.ac.uk/~jap/slipher/>.

2. W. Hoyt, *Biographical Memoirs of the National Academy of Sciences*, 52 (1980): 410.

3. S. Hawking, *The Universe in a Nutshell* (Nueva York, Bantam, 2001), pág. 76. [Hay traducción al castellano: *El universo en una cáscara de nuez* (Barcelona, Crítica, 2004).]

4. V. M. Slipher, *Proceedings of the American Philosophical Society*, 56 (1917): 403.

5. *Helvetica Physica Acta*, 6 (1933): 110.

6. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 33 (1939): 201.

7. M. Longair, *Our Evolving Universe* (Cambridge, Cambridge University Press, 1996), pág. 118. [Hay traducción al castellano: *La evolución de nuestro universo* (Madrid, Cambridge University Press, 1998).]
8. *Astrophysical Journal*, 159 (1970): 379.
9. M. Rees, *Just Six Numbers* (Londres, Phoenix, 2000), pág. 92. [Hay traducción al castellano: *Seis números nada más. Las fuerzas profundas que ordenan el universo* (Madrid, Debate, 2001).]
10. R. Kirshner, *The Extravagant Universe* (Princeton, Princeton University Press, 2002), pág. 92.
11. K. Sawyer, «Cosmic Force May Be Acting against Gravity», *Washington Post*, 27 de febrero de 1998.
12. *Science*, 279 (1998): 1298.
13. *Nature*, 448 (2007): 245.
14. S. Weinberg, *Dreams of a Final Theory* (Londres, Hutchinson, 1993), pág. 177. [Hay traducción al castellano: *El sueño de una teoría final. La búsqueda de las leyes fundamentales de la naturaleza* (Barcelona, Crítica, 2003).]
15. L. Susskind, «A Universe Like No Other», *New Scientist*, 1 de noviembre de 2003, pág. 34.
16. A. Gelter, «Is String Theory in Trouble?», *New Scientist*, 17 de diciembre de 2005, pág. 48.
17. «Nobel Laureate Admits String Theory Is in Trouble», *New Scientist*, 10 de diciembre de 2005, pág. 6.
18. *Astrophysical Journal*, 523 (1999): L99.
19. *Physical Review*, D 70 (2004): 083509.
20. Véase http://www.nasa.gov/home/hqnews/2006/aug/HQ_06297_CHANDRA_Dark_Matter.html
21. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 371 (2006): 138.
22. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 382 (2007): 29.
23. Véase <http://www-astro-theory.fnal.gov/events/detf.pdf>.
24. *Physical Review*, D 72 (2005): 101302(R).