

El universo cuántico: de la nada al todo

Viatcheslav Mukhanov

Los esfuerzos para comprender el universo son una de las poquísimas cosas que elevan la vida humana un poco por encima del nivel de la farsa y que le otorgan algo de la elegancia de la tragedia.

Steven Weinberg, *Los tres primeros minutos del universo* (1977)

El 21 de marzo de 2013 se produjo un acontecimiento extraordinario que, inmerecidamente, no suscitó excesiva atención por parte de la prensa y pasó prácticamente inadvertido para el gran público. El equipo científico [Planck](#) [1] publicaba la fotografía más precisa de nuestro universo tal y como era cuando contaba con tan solo unos pocos cientos de miles de años de vida. Dado que nuestro universo es sólo varios cientos de miles de veces más antiguo (trece mil millones de años), puede afirmarse, sin exagerar, que la foto publicada en marzo es el retrato del universo cuando éste era aún un pequeño «bebé». Dicho retrato es, no obstante, tan preciso como para permitirnos identificar todas las características adquiridas por el universo inmediatamente después de su nacimiento, características adquiridas cuando su edad era de sólo 10-35 segundos (un lapso tan pequeño que resulta imposible de imaginar). Sin embargo, lo más sorprendente de toda esta historia es que las características reveladas por el retrato del jovencísimo universo estaban en perfecta consonancia con lo que los físicos teóricos habían predicho treinta años antes de que se realizara el experimento.

Aunque pueda resultar difícil de asimilar, ya ha quedado experimentalmente probado que la Física Cuántica, responsable de la estabilidad de los átomos, ha determinado también la estructura de todo el universo, galaxias, estrellas y planetas incluidos. Además, es muy probable que incluso la totalidad de nuestro universo se produjera como consecuencia de una fluctuación cuántica a escalas mucho más pequeñas que el tamaño de los núcleos. Cabe imaginar que el número de universos producidos sea enorme, que, como nos dice el Zohar, «Dios cree nuevos mundos constantemente».

Cuando pienso en todo esto, mi memoria me conduce de vuelta a Moscú en el frío invierno de 1979-1980. Un invierno en el que la temperatura descendió por debajo de los cuarenta grados bajo cero. Recuerdo ver a un hombre en la calle, tendido en la nieve, y pensar que estaba congelado. Sin embargo, cuando dos policías levantaron el «cuerpo inerte», el hombre, para mi sorpresa, empezó a cantar. No estaba muerto, sino terriblemente borracho, y el frío no parecía preocuparle. Algunos años más tarde me di cuenta de que había quizá sólo dos maneras de sobrevivir sin daños psicológicos en la antigua Unión Soviética: volverse alcohólico o hacerse científico. Yo he elegido la segunda opción[2] y por aquel entonces era un licenciado en el Instituto Técnico de Moscú, que estaba considerada como una de las escuelas más elitistas de la Unión

Soviética. Para explicar cómo conseguí acabar allí tengo que retrotraerme al comienzo de los años setenta, cuando aún estaba estudiando en una escuela muy normal de una ciudad rusa de provincias.

Mi ciudad era tan diferente de Moscú como Moscú pueda serlo de París (la única cosa que tienen en común es que la distancia de Moscú a París es la misma que la de París a Moscú). La película *Gorki Park* muestra de manera bastante fiel cómo era la vida en el Moscú de aquellos días: todo era «gris», exceptuada la atmósfera intelectual en el seno de la comunidad científica. Sin embargo, esto lo aprendí mucho más tarde, después de trasladarme a Moscú. Antes estaba disfrutando de una vida normal con sus agradables cosas cotidianas en una pequeña ciudad rusa de la que un buen amigo mío dijo en cierta ocasión que era «un agujero del que nadie en este mundo ha oído hablar jamás»[3]. Lo cierto es que teníamos pan y patatas suficientes y, de vez en cuando, carne. ¿Acaso se necesita algo más? Mucho más importantes eran las cosas inmateriales y mi ciudad contaba con una magnífica librería en la que podía comprar libros excelentes (en la actual Rusia capitalista esta librería ha desaparecido). Fui quizás el único cliente que compraba libros de física y matemáticas escritos por John Archibald Wheeler, Richard Courant, Yákov Zeldóvich, etc.[4]

Fueron estos libros, y no las clases en el colegio (que no eran nada buenas), los que despertaron mi interés inicial por la Física y lo hicieron mientras los leía por mi propio placer intelectual, sin ninguna intención de llegar a ser algún día un científico. De hecho, nadie en mi familia tenía educación universitaria y siempre había oído en casa que para entrar en la universidad se necesitaba tener mucho dinero para corromper a las personas adecuadas (afortunadamente, esto resultó no ser del todo cierto). Por otro lado, entre las personas que conocía no había nadie que tuviera lo que los rusos llamaban mucho dinero. En una ciudad rusa de provincias esto solía significar que un «rico» era alguien que podía comprarse un mal coche (los buenos no existían). Para la «clase obrera» normal, a la que pertenecían mis padres, comprarse un coche era algo imposible aun ahorrando todo el salario de por vida. Esta es quizá la razón por la que nunca aprendí a conducir: cuando era lo bastante joven para aprender, no podía imaginar que llegara a tener nunca dinero suficiente para comprar un coche. Cuando me hice mayor, y tuve la posibilidad de comprarme un garaje completo lleno de coches, había perdido ya todo interés por conducir.

Afortunadamente para mí, el gran matemático ruso Andréi Kolmogórov tuvo la idea de fundar en Moscú una escuela matemática especial para chicos de provincia con talento. Pasé los exámenes de ingreso, que realicé con el propio Kolmogórov, y finalmente, en 1972, a la edad de dieciséis años, me mudé a Moscú, a la escuela de Kolmogórov. Allí estuve durante un año y al final me preparé para los exámenes de ingreso en la Universidad Estatal de Moscú, que eran muy difíciles, especialmente en matemáticas (no estoy muy seguro de que hoy fuera capaz de aprobarlos).

El número de plazas en los buenos institutos de Moscú era muy limitado y la competencia era extremadamente alta

Aquel año en la escuela de Kolmogórov fue muy importante porque, de lo contrario, habría suspendido los exámenes para ingresar en el Instituto Técnico de Moscú, donde comencé mis estudios en 1973. Cuando comparo cuánto estudiábamos con lo que lo

hacen en la actualidad los alumnos de la Ludwig-Maximilians-Universität de Múnich, en la que ahora doy clases, me quedo un poco perplejo. Durante los dos primeros años empezábamos a las ocho de la mañana y las clases y los laboratorios se prolongaban hasta las ocho de la tarde. Así los cinco días de la semana, y pasábamos los sábados y domingos resolviendo los problemas, sin que nos quedara tiempo para ninguna otra cosa. Cada semestre teníamos alrededor de diez exámenes, así que hube de pasar un total de un centenar de exámenes (en comparación con los diez aproximadamente de mi universidad alemana). Entre ellos los había también, a buen seguro, de marxismo-leninismo y de la historia del Partido Comunista de la Unión Soviética, que estudiábamos durante cinco cursos y que sólo resultaban de utilidad para desarrollar capacidades demagógicas (que, paradójicamente, no me parecieron útiles de alguna manera hasta mucho más tarde, cuando empecé a vivir en una sociedad con una cultura completamente diferente).

Además de estas asignaturas absolutamente inservibles, teníamos muchos cursos experimentales y enseguida reparé en que yo carecía por completo de talento y de interés para llegar a ser un físico experimental. Por otro lado, la teoría, que estudiábamos en el departamento de Física Química, era muy aburrida y consistía en su mayor parte en cuestiones de naturaleza aplicada, mientras que a mí me interesaban más el «cielo, las estrellas y la relatividad general».

El Instituto Técnico de Moscú había sido creado nada más concluir la Segunda Guerra Mundial, fundamentalmente con el objetivo de formar a especialistas en Física Nuclear, y estaba orientado principalmente a la Física aplicada. Como descubrí más tarde, cada año se permitía estudiar Física Teórica a tan solo veinte de cada seiscientos estudiantes, que eran divididos en dos grupos: uno tenía su sede en el Instituto Landáu y estaba dirigido por Lev Gorkov, mientras que el otro se radicaba en el Instituto Lebedev, y a su frente estaba Vitali Gínzburg, que recibió el premio Nobel en 2003 por sus trabajos sobre la superconductividad realizados conjuntamente con Lev Landáu. Para entrar a formar parte de cualquiera de estos grupos era necesario aprobar varios exámenes muy exigentes de Física Teórica. Los exámenes para entrar a formar parte del grupo de Gorkov eran decididamente mucho más difíciles y se realizaban en el estilo formalista de Landáu, donde la capacidad de realizar cálculos de manera rápida (algo que creo que puede aprenderse a hacer con facilidad) era claramente más importante que el entendimiento real de la Física. El estilo de Gínzburg era, sin duda, muy diferente (recuerdo que, más tarde, el propio Gínzburg me dijo que él no hubiera podido nunca aprobar el examen con Landáu) y no requería la capacidad de «competir con un ordenador». Este es el motivo por el que aprobé, no sin dificultades, los exámenes y, una vez superadas las trabas dentro de la Administración, que no favorecía el estudio de la Física Teórica (especialmente en los grupos en que la mayoría de los estudiantes eran judíos), entré a formar parte del grupo de Gínzburg.

Nunca he tenido una alta opinión de mis propias capacidades y lo primero que hice fue seleccionar un campo de investigación que no requiriera el uso de matemáticas en exceso complicadas y en el que el «nivel de arrogancia» no fuera tan alto como, por ejemplo, en la Física de partículas. Fue así como me convertí en astrofísico, al tiempo que soñaba con la posibilidad de que, con el tiempo, pudiera cambiarme a la Relatividad General y la Cosmología. Sin embargo, no podía imaginar ni siquiera en sueños que la Cosmología Teórica habría de convertirse en el futuro en mi principal

profesión. Pensaba, además, que los buenos tiempos podían terminar pronto y que, después de licenciarme, podría acabar en algún instituto militar en el que se me encomendaría algún trabajo «útil» pero terriblemente aburrido. Así que trataba de no pensar en el futuro y no hacer planes a largo plazo. Vivía absolutamente al día, disfrutando de la Física tanto como podía.

Había un buen motivo para adoptar esta actitud. El número de plazas en los buenos institutos de Moscú era muy limitado y la competencia era extremadamente alta (todas las plazas eran desde el principio fijas, ya que en la Unión Soviética no existía nada equivalente a las actuales plazas posdoctorales). Aún más importante era la *Moskovskaya propiska*, el permiso para trabajar y vivir en Moscú que se exigía para ocupar una de estas plazas. Este permiso se concedía de forma automática sólo a quien hubiese nacido en Moscú o estuviese casado con una mujer que ya tuviera este permiso. En la Unión Soviética, el título de *Moskvich* era de algún modo similar al título nobiliario en la Europa medieval. La manera más sencilla de conseguirlo era por medio del matrimonio, una posibilidad de la que no me valí. Muchos años después me concedieron el permiso por una decisión especial del Comité Central del Partido Comunista de Moscú e incluso me instalaron un teléfono en mi apartamento por orden del ministro de Comunicaciones de la Unión Soviética[5].

A pesar de todos los problemas prácticos que hube de afrontar mucho después, cuando entré a formar parte del grupo de Física Teórica de Gínzburg me sentía completamente feliz. Sabía que mi futuro estaba asegurado durante los tres años siguientes y que durante ese tiempo podría hacer todo aquello que me pareciera interesante, al margen de cómo influyera ello en mi futuro, que no pintaba muy bien en cualquier caso. No me preocupé mucho, por tanto, de «cosas irrelevantes» y pude concentrarme por completo en la Física. Mi primer director formuló el tema para mi trabajo final en términos muy amplios. Me dijo que existían muchas teorías diferentes sobre la formación de las galaxias y que tenía que intentar formular una nueva teoría que fuera mejor que las ya existentes. Se trataba de una buena enseñanza, porque sin aprender a pensar no se podría «sobrevivir». Ahora creo que esta es, quizá, la manera más eficaz de quitarse de encima a estudiantes que no tienen un verdadero interés y carecen de capacidades para trabajar en el ámbito de la Física Teórica, en vez de guiarlos como si fueran «gatitos ciegos».

Lo que me resultó extremadamente útil fueron los famosos seminarios de Gínzburg y Yákov Zeldóvich. Estos seminarios eran realmente sensacionales y los esperaba mucho más que los «días de celebraciones». Zeldóvich tenía su propio grupo, que competía amistosamente con el grupo de Gínzburg. A pesar de la saludable competencia, se alentaba la interacción entre los estudiantes de ambos grupos. Además, como Zeldóvich estaba más volcado hacia la Cosmología, me relacionaba con él mucho más que con Gínzburg. La «gran Física Teórica» en la Unión Soviética se concentraba principalmente por aquel entonces en torno a «unos pocos académicos fundamentales», como Vitali Gínzburg, Yákov Zeldóvich, Moisei Markov, Andréi Sájarov, Isaak Jalatnikov, Arkadi Migdal y otros[6].

Todos ellos gozaban de igual consideración, sin que hubiera ninguna personalidad dominante, y mantenían relaciones amistosas entre ellos. El ambiente intelectual era, por tanto, mucho más democrático y saludable en comparación con los que habría de

encontrar después de abandonar la Unión Soviética. Tengo que decir que, tras emigrar a Occidente, no encontré ningún lugar en el mundo que pudiera competir con el Moscú de los años ochenta en cuanto a concentración de intelectos y gran atmósfera científica. El ratio de intelecto *versus* arrogancia era en Moscú mucho más alto que incluso en Princeton. A diferencia de Estados Unidos, donde a los estudiantes casi se les obliga a hacer aquello que es popular en el mercado[7], los estudiantes de Rusia eran libres de elegir lo que ellos querían hacer. En este sentido, disfrutábamos de una libertad intelectual mucho mayor que los estudiantes de Estados Unidos e incluso de Europa. Creo que este es uno de los principales motivos por los que la Física Teórica tuvo tanto éxito en la Unión Soviética y podía competir con el resto del mundo. Además, quiero subrayar que, independientemente de cualesquiera títulos y logros pasados, la «distancia jerárquica» entre académicos y estudiantes no era muy grande cuando se trataba de ciencia. Recuerdo muchas «luchas» con Zeldóvich y Márkov cuando les decía abiertamente, si así lo pensaba, que estaban equivocados. Un día, la mujer de Márkov, que era física experimental, me dijo que no debería hablar de ese modo a mi jefe. Márkov se limitó a sonreírme y dijo que no había ningún problema. Recuerdo que un día que Zeldóvich afirmó de alguien, que era considerado como una gran autoridad, que no decía más que estupideces, me quedé muy sorprendido. De Zeldóvich y Gínzburg aprendí que las autoridades no existen cuando se trata de ciencia y que, en la Física, sólo el experimento puede asumir el papel de papa.

Hacia 1979 mi director decidió emigrar a Estados Unidos por motivos familiares. Yo acababa de comenzar mi trabajo de tesis y Gínzburg aceptó sustituirlo, a pesar de que mis intereses científicos no se solapaban demasiado con los suyos. Sin embargo, desde el principio el mismo Gínzburg me dijo que podía hacer lo que quisiera, pues pensaba que su principal tarea como director era no interferir con mis actividades de investigación. Para entonces yo ya había publicado dos trabajos de astrofísica sobre formación de galaxias que estaban relacionados directamente de alguna manera con observaciones. No obstante, me sentía bastante descontento con ambos artículos. Las observaciones, de hecho, no eran buenas en absoluto y permitían muchas interpretaciones diferentes. La sensación era que no había modo de decidir sobre bases experimentales qué teoría era mejor. Al final me sentí completamente decepcionado con la Astrofísica y en aquel momento no sabía realmente qué hacer.

Afortunadamente, Guennadi Chibisov, otro miembro del Instituto Lebedev, diez años mayor que yo, se acercó a mí y me sugirió cuantizar las inhomogeneidades y explicar así el origen de la estructura del universo. Cuando le pregunté, «¿Por qué no lo ha hecho nadie antes?», me respondió: «Porque no les importa». Ciertamente, el problema requería cálculos no triviales y un profundo conocimiento de teoría cuántica de campos. Sin embargo, en aquella época la mayoría de los físicos teóricos preferían bien hacer cosas formales, bien trabajar en la Física de partículas. La razón era que la Cosmología –la ciencia que trata del universo como un todo y de su origen– no estaba en muy buena forma en lo que respecta a su base observacional. La situación de la Cosmología a finales de los años setenta se encuentra muy bien descrita en el popular libro *Los tres primeros minutos del universo*, del físico de partículas Steven Weinberg (que recibió el premio Nobel en 1979 por el descubrimiento del modelo estándar de las interacciones electrodébiles). En este libro intenta excusarse en varias ocasiones por el hecho de, siendo un físico de partículas tan serio, haberse decidido a escribir un libro sobre un tema tan especulativo.

Los grandes científicos y filósofos se han sentido siempre interesados, por supuesto, por el universo como un todo, comenzando por los antiguos griegos e incluso antes. Arquímedes, por ejemplo, intentó calcular el diámetro del cosmos y el resultado que obtuvo fue de dos años luz (muy lejos del resultado correcto). En torno al siglo VIII, la cosmología puránica hindú sugirió que el universo pasa por ciclos repetidos de creación y destrucción, cada uno de los cuales tiene una duración de cuatro mil millones de años (casi el cálculo correcto). Immanuel Kant supuso que las nebulosas eran universos islas fuera de nuestra galaxia de la Vía Láctea. Sin embargo, todo ello no era una verdadera ciencia, sino más bien conjeturas fantasiosas que tenían idénticas probabilidades de ser verdaderas o falsas.

Al alejarnos de las grandes ciudades (mejor en las montañas), podemos contemplar un número increíblemente grande de estrellas en el cielo. Esas estrellas forman nuestra galaxia, que contiene alrededor de cien mil millones de astros. Si la luz tarda varios años en recorrer la distancia hasta la estrella más próxima, la luz necesita alrededor de cien mil años para alcanzar la estrella más remota de la galaxia. Con un pequeño telescopio pueden verse también algunos puntitos (nebulosas) que se diferencian en su forma de las estrellas y que no son tan brillantes como ellas. Sin embargo, no fue hasta 1923 cuando el astrónomo estadounidense Edwin Hubble, con un telescopio de cien pulgadas en el Monte Wilson, cerca de Los Ángeles, pudo observar las distintas estrellas que componen la nebulosa Andrómeda y determinar que esta se encontraba con seguridad fuera de nuestra galaxia. Este fue el comienzo de la astronomía extragaláctica, que desde entonces se ha basado en hechos firmes establecidos observacionalmente. También se identificaron algunas de las restantes nebulosas como objetos extragalácticos, cuya distancia con respecto a nosotros se fijó en varios millones de años luz. Hoy se ha determinado la existencia de alrededor de varios centenares de miles de millones de este tipo de objetos, que no son otra cosa sino galaxias similares a la Vía Láctea en que vivimos. Las estrellas, por tanto, forman objetos apelotonados -galaxias- con un tamaño de alrededor de cien mil años luz, que a su vez están separadas entre sí por una distancia de varios millones de años luz.

El hecho de que todas las galaxias estén escapándose de nosotros

no significa que vivamos en el centro del universo

Mediante la observación de las líneas espectrales (luz emitida por los elementos químicos conocidos con una longitud de onda definida), Hubble descubrió, a finales de los años veinte, que la longitud de onda de la luz emitida por las galaxias era un poco mayor de lo que se esperaba, esto es, con un desplazamiento hacia el rojo. Interpretó este corrimiento hacia el rojo como un efecto Doppler debido al movimiento de la galaxia observada. Algo así como si, de alguna manera, intentara escaparse de la nuestra. Creo que todo el mundo ha tenido alguna vez una experiencia personal con el efecto Doppler. Imagine que se encuentra cerca de los raíles de un tren. El sonido del silbato del tren suena de forma diferente cuando el tren se acerca y después de haber pasado. Cuando se acerca, el sonido tiene frecuencias más altas, mientras que el silbato del tren que se aleja suena más grave y está dominado por frecuencias bajas, corridas hacia el rojo. Quizás haya prestado también atención al hecho de que, cuanto mayor sea la velocidad del tren, más drástico es el cambio del sonido. Hubble

descubrió que las galaxias más lejanas tienen el espectro más corrido hacia el rojo, lo que quiere decir que están alejándose de nosotros a mayores velocidades, y que estas son proporcionales a la distancia. Lo que esto nos indica es que el universo está expandiéndose. Este descubrimiento fue, sin duda, el comienzo de la Cosmología científica basada en hechos, y no en fantasías.

El hecho de que todas las galaxias estén escapándose de nosotros no significa, sin embargo, que vivamos en el centro del universo. De hecho, si suponemos que el universo es a grandes escalas homogéneo e isótropo[8], el observador de cada galaxia debería ver la misma imagen de la expansión. ¿Cómo puede entenderse esto? Imaginemos que el radio de la Tierra empezara a crecer. Entonces las distancias entre las ciudades (en caso de que sobrevivieran) empezarían también a crecer y, teniendo en cuenta las velocidades relativas a las que las ciudades «escapan unas de otras», descubriríamos exactamente la misma ley que Hubble descubrió a partir de las galaxias. Sin embargo, en este caso no hay ninguna ciudad privilegiada y los habitantes de cualquiera de ellas ven la misma imagen de la expansión.

Con el descubrimiento de Hubble quedó claro que nuestro universo está evolucionando como un todo. En realidad, esto no supuso ninguna gran sorpresa. Aunque, en 1917, incluso Einstein pensaba que el universo no cambiaba a grandes escalas, en 1922, el físico ruso Aleksandr Friedmann, al resolver las ecuaciones para la gravedad de Einstein en el caso de un universo homogéneo e isótropo, descubrió que las únicas soluciones genéricas que admiten estas ecuaciones son las que describen un universo bien en expansión, bien en contracción. Asumiendo que la masa total del universo es alrededor de cien mil millones de veces mayor que la masa de nuestra galaxia, Friedmann pudo incluso calcular cuándo comenzó esta expansión y el resultado que obtuvo para la edad de nuestro universo fue de diez mil millones de años. El descubrimiento de Hubble, por tanto, puede considerarse como una brillante confirmación de la predicción teórica de Friedmann. Sin embargo, sobre la base de sus datos, Hubble descubrió que las galaxias en su conjunto tenían una edad de alrededor de mil millones de años, lo que estaba en abierta contradicción no sólo con la predicción de Friedmann, sino también con la edad de la Tierra, que parece ser mayor. Lo cierto es que esto ponía en duda toda la idea de la expansión del universo, porque la Tierra no podía ser más antigua que el universo. Más tarde se descubrió que Hubble había subestimado las distancias hasta las galaxias por un factor de diez como consecuencia de los conocidos como errores sistemáticos en que suelen incurrir los astrofísicos. La conclusión más importante que se derivaba del descubrimiento de Hubble era que el universo se creó hace varios miles de millones de años[9] y, en este caso, nos enfrentamos de inmediato a numerosas incógnitas.

Por ejemplo, se sabe muy bien que la gravedad es una fuerza atractiva y que, por tanto, lo único que puede hacer es ralentizar la expansión. La pregunta evidente es entonces: ¿quién o qué había producido las enormes velocidades iniciales (Big Bang) que se necesitaban para la expansión? La gravedad sólo podía ralentizar estas velocidades a sus valores actuales. La otra pregunta es: ¿de qué manera se ha logrado la muy peculiar distribución homogénea de la materia en el enorme volumen del espacio? Estaba claro que los procesos físicos no pueden ser responsables de ello debido a la velocidad finita de la luz, que limita las escalas a las que puede comunicarse información y, por tanto, correlacionar la distribución de materia. Para explicar el

origen del universo observable se requería que la distribución de materia se correlacionara con precisión en un enorme número de regiones sin comunicación, un número de regiones que exceden en miles de millones de veces el número de átomos en todo nuestro universo. Para hacerse una idea de la dificultad, piénsese en cientos de miles de personas que acuden a un gran estadio e imagínese que, en un momento dado, todos se volvieran sordos y ciegos. Está claro lo que sucederá a continuación: la multitud se hallará muy pronto en un estado de caos absoluto. Una situación similar, pero mucho peor, fue la que se produjo en el momento de creación del universo. Era semejante a un estadio con muchos billones de personas sordas y ciegas que conseguían mantener, sin embargo, un orden perfecto. Resultaba, por tanto, absolutamente confuso entender cómo pudo empezar el universo con una expansión extremadamente ordenada. Parecía como si todas sus partes, completamente desconectadas, supieran de antemano qué hacer y empezaran a moverse, en consecuencia, en perfecta consonancia. Este problema siguió siendo un gran misterio durante muchos años y no se resolvió hasta hace tres décadas, con la invención de la cosmología inflacionaria.

Aun siendo extremadamente importante, el descubrimiento de Hubble acabó por ser para muchos el único hecho de la cosmología experimentalmente establecido. Hubo que esperar más de treinta años para que se descubriera la otra pieza del rompecabezas.

En 1964, dos radioastrónomos estadounidenses, Arno Penzias y Robert Wilson, encontraron en su antena de radio un ruido infrecuente cuyo origen no podían explicar. Pronto se dieron cuenta de que este ruido, por cuyo descubrimiento obtuvieron el premio Nobel en 1978, podía deberse a la radiación primordial, que sobrevivió después del Big Bang. Cuando miramos el cielo, tan solo una parte relativamente pequeña de él está cubierta por las estrellas y nebulosas, mientras que, entre medias, el cielo parece absolutamente oscuro. ¿Significa esto realmente que no hay absolutamente ninguna luz procedente de estas partes oscuras del cielo? Penzias y Wilson descubrieron que la parte oscura del cielo no es en absoluto oscura. De hecho, hay ondas de radio que proceden de todas las partes del cielo. No pueden verse con los ojos ni con los telescopios ópticos, pero los radiotelescopios pueden verlas muy bien. Dado que la intensidad de las ondas de radio observadas no depende para nada de la dirección en el cielo, resulta plausible suponer que estas ondas de radio no eran emitidas por algunas fuentes de radio, sino que más bien eran una reliquia de la creación de nuestro universo.

Una radiación así, que viene completamente caracterizada por su temperatura, recibe en Física el nombre de radiación de cuerpo negro. Al medir la intensidad de esta radiación en las longitudes de onda de unos pocos centímetros, Penzias y Wilson descubrieron que su temperatura debe situarse entre 2,5 y 4,5 grados Kelvin (para recalcular esta temperatura en los familiares grados Celsius, hay que restar 273, por lo que la temperatura de la radiación es de alrededor de 270 grados Celsius bajo cero). La radiación primordial impregna homogéneamente todo el espacio, mientras que los átomos, cuyos núcleos se construyen a partir de protones y neutrones (ambos se llaman bariones), se arraciman fundamentalmente en galaxias. El número de cuanta (que se conoce como fotón) de la radiación primordial es mucho mayor que el número total de bariones del universo. Por ejemplo, si se extendieran homogéneamente todos los

bariones por el universo, en un metro cúbico habría alrededor de mil millones de fotones y sólo un barión. El descubrimiento de la radiación del Fondo Cósmico de Microondas (CMB, por sus siglas en inglés) supuso el comienzo de la teoría del universo caliente en expansión.

Está claro que la temperatura de 270 grados Celsius bajo cero no se encuentra en absoluto asociada en nuestras mentes con algo «caliente». Sin embargo, no debería olvidarse que el universo se expande. Todo el mundo sabe que si un gas caliente en un recipiente se expande, se enfría. Algo similar sucede con la radiación y, además, su temperatura desciende en proporción inversa al tamaño del recipiente. Esto quiere decir que cuando el universo era miles de veces más pequeño y tenía sólo unos cientos de miles de años de vida, la temperatura de la radiación era de unos tres mil grados, y esto sí que es realmente caliente. Además, tres mil grados es suficiente para ionizar todos los átomos liberando los electrones, creando así una sopa opaca de materia. Sólo después de que la temperatura descendiera por debajo de los tres mil grados, y de que la mayoría de los electrones libres fueran capturados por los núcleos, el universo se convierte en transparente para la radiación primordial. Es a partir de este momento cuando una abrumadora mayoría de los fotones no quedan dispersados por la materia, proporcionándonos así la «fotografía» del universo cuando tenía sólo unos pocos cientos de miles de años de vida.

La fotografía, tal y como la tomaron Penzias y Wilson, nos mostraba que, aunque hoy vemos galaxias, estrellas, etc., cuando el universo era mucho más pequeño carecía por completo de estructura. La temperatura medida era exactamente la misma en todas las direcciones en el cielo aunque, si la cantidad de materia fuera un poco diferente en varios lugares, podrían verse sus variaciones.

Una vez más, no puede decirse que el hecho de que el universo pudiera estar caliente supusiera una gran sorpresa. De hecho, al tratar de explicar el origen de los elementos químicos en el universo, el físico ruso-estadounidense George Gamow ya había sugerido en 1948 que la temperatura en el universo inicial podía ser extremadamente alta. A partir de las observaciones de la intensidad de líneas espectrales, se sabía que nuestro universo se compone fundamentalmente de hidrógeno y helio. El resto de los elementos químicos más pesados de la tabla periódica se encuentran presentes en cantidades realmente muy pequeñas. Si pudieran seguir produciéndose los elementos pesados en las estrellas como consecuencia de reacciones nucleares, la abundancia del helio sería difícil de comprender. Aunque los cálculos concretos de Gamow no eran del todo correctos, adivinó por casualidad el valor correcto para la temperatura de la radiación[10]. Los cálculos de Robert Wagoner, William Fowler y Fred Hoyle en 1967 confirmaron que la abundancia de los elementos ligeros puede explicarse realmente con la teoría del Big Bang caliente.

A finales de los años setenta, cuando me introduje en la Cosmología, lo único que se sabía era que el universo está expandiéndose y que era muy probable que hubiera estado muy caliente en el pasado. Aunque la mayoría de los cosmólogos (no había tantos) creían que lo que realmente veíamos eran los restos del Big Bang, su existencia no era aún un hecho establecido, sino tan sólo una más que plausible interpretación de las observaciones. Para demostrar más allá de cualquier nivel de duda que la radiación realmente sobrevivió del Big Bang, se necesitaba medir la intensidad de la radiación a

diferentes longitudes de onda (su espectro) y verificar que, por ejemplo, presenta un máximo de intensidad para longitudes de onda de aproximadamente una décima de centímetro. Sin embargo, para este tipo de ondas de radio, la atmósfera terrestre no es transparente y, por tanto, se necesita ir por encima de ella valiéndose bien de globos o de cohetes espaciales. No obstante, a finales de los años setenta las mediciones de los globos estaban arrojando resultados contradictorios y, por tanto, toda la teoría del Big Bang caliente se basaba únicamente en un hecho y medio.

Resulta evidente que, al situarse sobre una base tan poco firme, la Cosmología no despertara demasiada atención. Sin embargo, algunos de los grandes teóricos de Rusia sí que estaban tomándosela muy en serio. El más importante de todos ellos era Yákov Zeldóvich, quien, junto con su grupo, estaba dedicando la mayor parte de su tiempo a la Cosmología y la Astrofísica. En colaboración con Ígor Nóvikov, escribió incluso un manual de setecientas páginas sobre el origen y la estructura del universo en 1974. Yo tuve la suerte de comprar este libro y leerlo cuando estaba aún en mi segundo año de carrera. Además, varios años después conocí a Zeldóvich y tuve la fortuna de aprender Cosmología personalmente con él. Y lo que sucedió fue que la curiosidad me llevó al lugar adecuado y en el momento justo. Un buen amigo mío, que ha hecho importantes contribuciones a la física de los agujeros negros, me dijo en cierta ocasión que él había escrito sus artículos importantes no porque fuera un genio, sino simplemente porque estaba en el momento justo en el lugar adecuado y no era estúpido. Por pura casualidad, el tema que yo decidí era el adecuado y el lugar era el correcto, por lo que la única condición que se necesitaba para estar satisfecho era «no ser estúpido».

Uno de los problemas que ocupaban seriamente a los cosmólogos en aquella época era el de la formación de galaxias. De la observación de la radiación de fondo se concluyó que el universo no poseía ninguna estructura cuando era mil veces más pequeño. Entonces la pregunta natural es: ¿cómo pudieron formarse en este caso las galaxias? La idea clave aquí es que las galaxias se formaron como consecuencia de la inestabilidad gravitacional. Dado que la gravedad es una fuerza atractiva, intenta lograr que la distribución de la materia sea cada vez más apelotonada, a pesar de que originalmente fuese homogénea. La situación es aquí similar al mercado financiero, en el que los ricos pasan a ser incluso más ricos. Por ejemplo, en los años setenta el 0,1% de los estadounidenses más ricos poseían el 2% de la riqueza del país, mientras que en 2008 poseían el 8%. Algo similar está sucediendo en el universo. Aquellos lugares en que hay más materia atraen materia de las regiones cercanas menos densas y, al final, el universo pasa a estar muy apelotonado, con casi todos los bariones concentrados en las galaxias. Sin embargo, para conseguir hoy una distribución apelotonada de la materia tenemos que suponer que en el principio del universo hubo algunas inhomogeneidades iniciales, aunque pequeñas. La respuesta a la pregunta de cuán grandes debían ser estas inhomogeneidades iniciales depende de la velocidad a la que crezcan. Si el aumento de la desigualdad de ingresos en Estados Unidos por un factor 4 requirió aproximadamente cuarenta años, está claro que en el universo las cosas están sucediendo a escalas cosmológicas.

El problema de la inestabilidad gravitacional fue examinado por primera vez a comienzos del siglo pasado por James Jeans, que descubrió que en medios que no están en expansión esta inestabilidad es extremadamente eficiente y se produce a un ritmo

exponencialmente rápido (de un modo similar a lo que sucede en el mercado financiero). Sin embargo, en 1946, Evgueni Lifshitz descubrió que en el universo en expansión este fenómeno no es en absoluto tan rápido. Mostró en concreto que, a escalas mayores que el tamaño de la región causalmente conectada, que es igual a la velocidad de la luz multiplicada por la edad del universo, las inhomogeneidades no crecen porque no tienen la posibilidad de comunicarse, mientras que cuando la edad del universo aumenta y la comunicación resulta posible, empiezan a crecer sólo en proporción directa al tamaño del universo en expansión. Esto significaría que, a las escalas galácticas, todas las inhomogeneidades iniciales estuvieron congeladas hasta que el universo tuvo alrededor de cien mil años y sólo a partir de entonces, a grandes escalas, habrían aumentado en un factor de varios miles. Así, para explicar la estructura del universo se necesita suponer un cierto grado de inhomogeneidad que debería poder verse, pero que no se observaba en la foto de Penzias y Wilson. Los primeros cálculos teóricos realizados por Rashid Sunyaev y Yákov Zeldóvich en 1970 para las previsible fluctuaciones en la temperatura de la radiación de fondo no eran aún muy precisos y era posible justificar que estas variaciones de temperatura se encontraban por debajo de la sensibilidad de los detectores. Sin embargo, también estaba meridianamente claro que, si la suposición de un universo caliente en expansión es correcta, entonces el incremento de la sensibilidad de los radiodetectores por un factor de diez o cien conduciría inevitablemente a descubrir la variación de la temperatura en el cielo. De lo contrario, toda la teoría, que se sustenta sobre una base aún poco firme, se vendría abajo.

Esta situación de la Cosmología observacional explica también la existencia de muchas teorías de la formación de galaxias propuestas hace unos treinta años. En relación con la naturaleza de las perturbaciones, podría suponerse que la radiación y los bariones estaban ambos distribuidos de una forma un poco inhomogénea, mientras que el número de fotones era exactamente el mismo de un lugar a otro. Esto se bautizó como la teoría de las perturbaciones adiabáticas, que se desarrolló fundamentalmente en la Unión Soviética y que no fue tan bien aceptada en Occidente. En Estados Unidos, la teoría más popular consistía en suponer que, inicialmente, los bariones estaban distribuidos de un modo ligeramente inhomogéneo dentro de la distribución completamente homogénea de la radiación. Además, las teorías de la turbulencia cosmológica, que se suponía que explicaban la rotación de las galaxias, seguían aún vigentes por aquel entonces. También se desconocía por completo si la distribución inicial de inhomogeneidades era completamente aleatoria (las conocidas como perturbaciones gaussianas) o tenía codificada en su interior alguna información adicional (no-gaussianidad). Más tarde surgieron, por ejemplo, las teorías de cuerdas y texturas cósmicas y afirmaron estar en consonancia con las observaciones que predecían una gran no-gaussianidad.

En aquellas circunstancias, estaba claro que, transcurridos algunos años, yo me había cansado de intentar inventar alguna teoría que describiera mejor algo de lo que ni siquiera estábamos seguros. Por tanto, cuando Chibisov me sugirió dedicarme a un tema mucho más académico, que en aquel momento no tenía demasiado que ver con las observaciones directas, me mostré encantado de aceptar su propuesta.

Asumiendo que la teoría de un universo caliente y homogéneo era correcta, decidimos investigar el posible origen de las inhomogeneidades primordiales, que más tarde

habrían crecido para producir las galaxias. Partiendo de la base de que, por algún tipo de motivo desconocido, el universo fue creado en un estado completamente homogéneo, nos intrigaba la pregunta de si las fluctuaciones cuánticas iniciales podrían explicar o no la estructura del universo. Después de haber completado nuestro trabajo, descubrimos que en 1965 (antes incluso de la aparición de la teoría del Big Bang caliente), el famoso físico ruso Andréi Sájarov había intentado también utilizar las perturbaciones cuánticas, pero fracasó. Cuando, a mediados de 1979, empecé a trabajar en el problema, hicimos tabla rasa y la primera tarea que abordé fue la de cuantizar las perturbaciones cosmológicas. La cuantización de las ondas gravitacionales se conocía bien por entonces. Sin embargo, nadie había intentado nunca cuantizar el campo gravitacional inducido por la materia cuántica. Para hacernos una idea de lo que esto significa, y saber de dónde procedían estas fluctuaciones cuánticas, retrotraigámonos a mediados de los años veinte del siglo pasado.

El elemento fundamental de la teoría cuántica es el principio de incertidumbre de Heisenberg. Este principio nos dice que, independientemente de lo que se haga, no puede tenerse una partícula en reposo absoluto en un punto dado: existe siempre una incertidumbre tanto en su posición como en su velocidad, que excede la conocida como constante de Planck dividida por la masa de la partícula. En concreto, este principio explica la estabilidad de la materia al decirnos por qué los electrones en los átomos no colapsan sobre los núcleos. Si aplicáramos ahora este principio a una distribución homogénea de materia como la que se supone que constituye el universo en sus primeros momentos, el principio de incertidumbre nos diría que no podemos localizar simultáneamente la materia y su velocidad y que, como consecuencia de ello, se producirían siempre mínimas inhomogeneidades. Eran estas inhomogeneidades, inevitables de acuerdo con el principio de incertidumbre, las que queríamos utilizar para explicar las galaxias.

La idea puede parecer, en un principio, completamente enloquecida. En efecto, todos sabemos que los efectos cuánticos son significativos solamente a escalas atómicas o más pequeñas y lo que pretendíamos era utilizarlas a escalas galácticas, que son más de un trillón de trillón de trillón de trillones más grandes. Por otro lado, si nos tomamos en serio la teoría del universo en expansión, toda la materia que vemos hoy en cientos de miles de millones de galaxias estuvo en un principio concentrada en una caja de cerillas. De alguna manera, la expansión podía estar actuando como un amplificador capaz de convertir las mínimas fluctuaciones cuánticas en galaxias o, en otras palabras, como el nexo de unión entre la Física Atómica del microcosmos y la Cosmología del macrocosmos como un todo.

Recuerdo ver a un hombre en la calle, tendido en la nieve, y pensar que estaba congelado. Sin embargo, cuando dos policías levantaron el cuerpo inerte, el hombre, para mi sorpresa, empezó a cantar

Pasé cerca de un año haciendo cálculos, que por entonces, para mí, presentaban un aspecto horrible. Las fórmulas ocupaban páginas y más páginas, sin ninguna esperanza clara de que se simplificaran y pudieran llegar a ser de alguna utilidad. Pensé muchas veces en tirar la toalla. De haber conocido entonces la famosa frase de Winston Churchill («Nunca, jamás, te des por vencido»), no me habría sentido tan incómodo,

pero no la conocía[11]. Sin embargo, en la primavera de 1980 las largas fórmulas empezaron de repente a acortarse y la teoría de las perturbaciones cosmológicas cuánticas estaba ya formulada en lo esencial. Pasé los dos meses siguientes intentando aplicar el formalismo para encontrar un modelo concreto para el universo primitivo en el que pudieran resultar útiles estos cálculos. Buscaba, en otras palabras, un modelo en el que las fluctuaciones cuánticas pudieran ser fuertemente amplificadas. Nada parecía funcionar y la sensación era que había transcurrido todo un año sin ningún éxito final. En dos meses pude demostrar que, si la gravedad es atractiva (tal como sabemos), entonces las fluctuaciones cuánticas resultaban inútiles para las galaxias. Después empezamos a discutir con Chibisov lo que parecía ser la única opción posible: qué es lo que pasaría si partiéramos del supuesto de que durante un tiempo muy breve del pasado remoto, inmediatamente después del nacimiento del universo, la gravedad, en lugar de ser una fuerza atractiva, hubiera sido una fuerza repulsiva (antigravedad). ¡Y funcionó!

Fue así como, a mediados de 1980, supimos inequívocamente que las fluctuaciones cuánticas pueden resultar útiles sólo si el universo experimentó una fase de expansión acelerada. Este resultado se presentó en la publicación núm. 138 del Instituto Lebedev a mediados de aquel mismo año[12]. No logré tener listo el cálculo detallado de las perturbaciones (su espectro) hasta medio año después. Sucedió cuando estaba visitando a mis padres en mi ciudad natal a finales de 1980. Recuerdo que la idea se me ocurrió en la noche del 31 de diciembre al 1 de enero. Cancelé la visita a casa de unos amigos con los que tenía previsto celebrar la llegada del nuevo año y preferí quedarme en casa haciendo cálculos en compañía de una botella del horrible brandy búlgaro Pliska. Cuando me desperté la mañana siguiente con un terrible dolor de cabeza, comprobé que, sorprendentemente, y a pesar del brandy, no había cometido ningún error y los resultados eran correctos. Los cálculos eran muy complejos. Sin embargo, gracias a haber tenido experiencias anteriores con cálculos incluso más difíciles, conseguí fijar por completo todos los detalles técnicos en una semana y volví a Moscú con el resultado final. Este artículo, que resolvía el misterio de los «embriones de las galaxias», fue inicialmente rechazado por la revista, pero tras la intervención de Ginzburg, fue publicado finalmente en *JETP Letters* en mayo de 1981. El trabajo contiene tres predicciones que, en principio, podían ser verificadas. La primera era que, en contra de la más popular de las teorías occidentales sobre la formación de galaxias, predecíamos que las perturbaciones debían ser adiabáticas y gaussianas. Sin embargo, la predicción menos trivial guardaba relación con el cuadro detallado de las inhomogeneidades que se generaban. Habíamos descubierto que las inhomogeneidades a las mayores escalas debían ser ligeramente (logarítmicamente) más grandes que a escalas pequeñas, lo que de manera algo más técnica se resume en un número conocido como el índice espectral. El valor que obtuvimos fue de 0,96 (un número que recomiendo al lector que memorice). La razón física para ello era la necesidad de tener una transición desde el estadio de antigravedad al estadio de gravedad normal.

Recuerdo que, cuando observé por primera vez la fórmula con esta dependencia completamente inesperada, me quedé pensando que, si esta dependencia se encontrara al día siguiente, entonces se produciría una confirmación al cien por cien de nuestra teoría. Sin embargo, el estado de las observaciones experimentales en aquella época era tan pobre que resultaba imposible imaginar que este resultado extremadamente no trivial pudiera ser verificado incluso en los cien años siguientes. También descubrimos

que, para obtener suficientes inhomogeneidades, es necesario asumir que el estadio de antigraedad se produjo 10-35 segundos después de la creación del universo. Se trata de un número inimaginablemente pequeño y la densidad de materia en el universo en este momento era tan enorme que un volumen comparable al de una caja de cerillas contenía más materia que la totalidad del universo en la actualidad.

El estado de la materia, que produce la necesaria antigraedad (ahora recibe el nombre de Energía Oscura), no estaba completamente injustificado. De hecho, ya en 1917 Einstein había modificado sus ecuaciones de la gravedad al introducir la constante cosmológica. (Más tarde, equivocadamente –tal y como hoy sabemos–, tildó esta modificación de la «mayor metedura de pata» de su vida.) Esta constante cosmológica conduce, de hecho, como se sabe ahora, a la antigraedad y esto le permitió a Einstein derivar el universo estático, en el que la gravedad de la materia normal se veía compensada por la antigraedad inducida por la constante cosmológica. En 1917, Willem de Sitter había obtenido una solución de las ecuaciones de Einstein dominada por la constante cosmológica. No fue, sin embargo, hasta 1925, después de que Aleksandr Friedmann descubriera la solución dinámica para el universo en expansión, cuando Georges Lemaître se dio cuenta de que la solución de De Sitter describe también, de hecho, el universo en expansión, en el que domina la antigraedad. Por tanto, en este caso el universo pudo nacer sin velocidades iniciales y la antigraedad aceleraría la materia hasta las enormes velocidades que se necesitaban, resolviendo con ello el problema del Big Bang. En este caso, la antigraedad sería enteramente responsable de la creación de nuestro universo en el estado de expansión. Sin embargo, después del descubrimiento de la expansión por parte de Hubble, la constante cosmológica quedó prácticamente olvidada. Lev Landáu prohibió que se mencionara siquiera en sus seminarios. Aparecía de vez en cuando en la literatura, pero no suscitaba demasiada atención porque no estaba nada claro para qué podría resultar útil. Sin embargo, en 1978, Robert Brout, François Englert (que recibió en 2013 el premio Nobel de Física junto con Peter Higgs) y Edgard Gunzig se dieron cuenta de que, al admitir un estadio de antigraedad en el pasado, es posible explicar fácilmente el origen de nuestro enorme universo y, además, en este caso la producción de los universos pasa a ser tan fácil que surge el problema de cómo evitar la sobreproducción de los mismos. En su artículo de 1978 la idea se escondía detrás de demasiados detalles técnicos y el artículo pasó prácticamente inadvertido.

De hecho, no podía utilizarse la constante cosmológica por sí misma a fin de explicar la producción del universo, porque al final ha de decaer en la materia gravitacional normal. Se necesitaba, por tanto, una sustancia que simplemente imitara la constante cosmológica pero que finalmente acabaría decayendo suavemente para producir la materia normal. En 1979, Aleksei Starobinski, al intentar solucionar el problema de la singularidad inicial (en la que todas las cantidades físicas pasaban a ser infinitas y a estar fuera de control por las leyes físicas), descubrió un modelo en el que el vacío polarizado cuánticamente imitaba un estadio dominado por la antigraedad y su ulterior decaimiento. Aunque nuestros primeros cálculos de las perturbaciones cuánticas se hicieron conforme a un modelo en el que hacíamos «a mano» que la constante cosmológica decayera, conseguimos finalmente derivar el espectro final de inhomogeneidades valiéndonos del modelo de Starobinski. También pudimos mostrar que las fluctuaciones cuánticas destruyen en tiempo finito el estadio de antigraedad y, aunque se resuelve así el problema de las perturbaciones iniciales, persiste el problema

de la singularidad que intentaba resolver Starobinski.

A comienzos de 1981, Alan Guth publicó un artículo en *Physical Review* en el que formulaba de una manera muy natural la necesidad de suponer que en el pasado el universo atravesó una etapa de expansión acelerada, a la que él daba el nombre de inflación cósmica. En consecuencia, no sólo las fluctuaciones cósmicas requerían de esta etapa de expansión acelerada, sino que existen más razones para suponer que existió una etapa así en el pasado. Probablemente, Guth no estaba al corriente del trabajo de Starobinski y no consiguió descubrir un modelo concreto en el que la constante cosmológica decayera de un modo suave y natural. Sin embargo, gracias fundamentalmente a Andréi Linde, supimos muy pronto que existen muchos modelos que pueden servir a ese propósito. Así, a comienzos de los años ochenta, se creó el campo de la Física que se conoce con el nombre de Cosmología Inflacionaria.

La palabra inflación reflejaba con mucha precisión la esencia de este estadio. De hecho, la expansión acelerada eliminó cualquier resto del pasado, con excepción de las fluctuaciones cuánticas, que estaban desempeñando el papel de «dinero oro», ya que, de lo contrario, el universo acabaría en un estado de absoluto «desierto». Si antes de la invención de la inflación resultaba incluso difícil imaginar cómo pudo nacer un universo tan complejo y daba la impresión de que su creación había requerido extraordinarios esfuerzos, con la invención de la Cosmología Inflacionaria el paradigma cambió drásticamente. Se concluyó que si el Creador se valía de la antigravedad, la producción del universo se convierte en algo infinitamente fácil. Puede empezarse simplemente con una pequeña fluctuación cuántica, se pone en el estado de antigravedad y, a continuación, el enorme universo puede producirse dentro de una fracción de segundo extremadamente pequeña. De hecho, la energía total de todo el universo es igual a cero, puesto que la energía positiva de la materia se compensa exactamente con la energía gravitacional negativa. Está claro que, si la expansión se acelera, la energía de la materia debería crecer, mientras que la energía del campo gravitacional pasa a ser cada vez más negativa para compensar los crecimientos de la energía de la materia. De este modo, la cantidad de materia que se necesita para construir centenares de miles de millones de galaxias puede emerger en una insignificante fracción de segundo. La energía necesaria se toma de la reserva gravitacional infinitamente profunda, que puede aportar una cantidad infinita de energía si se utiliza la antigravedad con este propósito.

También se concluyó que la existencia del estadio de antigravedad en el pasado da lugar a una predicción más robusta, a saber, que la inflación cósmica predice que, en la actualidad, el universo debería tener una geometría euclidiana (plana) a escalas cosmológicas. Consideradas conjuntamente estas tres predicciones para las perturbaciones iniciales, que tienen que ser adiabáticas, gaussianas y que deberían crecer ligeramente hacia escalas mayores (índice espectral de 0,96), la inflación cósmica podría considerarse como una de las teorías más predictivas no sólo de la Astrofísica, sino de toda la Física. La única cuestión que restaba por abordar era: ¿cómo verificar todas estas predicciones?

Aunque la inflación cósmica se acogió con gran entusiasmo (especialmente en el ámbito de la Física de partículas) como una gran idea, en los años ochenta no hubo

noticia alguna de su verificación experimental y la mayoría de los físicos la consideraban como una pura muestra de fantasía científica (recuerdo mis conversaciones con Ginzburg a finales de los años ochenta, cuando afirmaba que, a falta de confirmaciones experimentales, no se trata aún de verdadera Física). Además, en los años ochenta, e incluso en los noventa, las observaciones astronómicas entraban, aparentemente, en conflicto directo con las predicciones inflacionarias. Gracias a que las observaciones no eran de una gran calidad, la teoría pudo seguir sobreviviendo, al menos, como un ámbito de actividad de los físicos teóricos.

De hecho, hasta 1998 aproximadamente, todas las observaciones astronómicas estaban señalando que no hay materia suficiente para hacer el universo plano y lo que parecía era que tenía geometría de Lobachevski a escalas cosmológicas. Como ya se ha señalado, las perturbaciones adiabáticas, gaussianas, no eran las más favorables desde el punto de vista de las observaciones. Se afirmaba que eran bien las perturbaciones entrópicas o las inhomogeneidades debidas a los defectos topológicos cósmicos (que inducen enormes no-gaussianidades) las que describen las observaciones mucho mejor que las perturbaciones adiabáticas, gaussianas. Finalmente, la calidad de las observaciones era tal que no podía siquiera soñarse con ver las esperadas diminutas variaciones de la temperatura en el cielo. Todo esto podía poner en duda incluso el universo en expansión caliente.

Esta era la situación cuando defendí mi tesis doctoral sobre las perturbaciones cosmológicas cuánticas en 1982. Si la condición necesaria para la defensa de la tesis en Física Teórica era la confirmación experimental de la teoría, entonces suspendería sin ninguna duda. Esto, por fortuna, no se necesitaba y logré doctorarme. La principal pregunta a continuación era cuál sería mi siguiente paso. Aunque conseguir un puesto en uno de los institutos de investigación no era nada fácil, el principal obstáculo para mí era, sin embargo, «el permiso para trabajar en Moscú». Poco antes, Zeldóvich le había ofrecido a Chibisov (y a mí como complemento de Chibisov) un puesto en uno de sus grupos, pero esta propuesta no llegó nunca a materializarse, porque Chibisov no tenía el más mínimo interés en ella. Por otro lado, las posibilidades de Ginzburg de hacer algo por mí eran muy limitadas y mis perspectivas de futuro parecían reducirse a quedarme sin trabajo o a trasladarme a algún instituto de provincias al cabo de pocos meses. Llegó un momento, por tanto, en el que tuve que dejar de pensar en los problemas del universo y hube de empezar a pensar en los problemas en la Tierra. Leonid Ozernoi, que estaba esperando el permiso para emigrar a Estados Unidos desde hacía al menos tres años, me dio un buen consejo. Pedí a Ginzburg que preguntara al director del departamento nuclear de la Academia de Ciencias, Moisei Markov, si tendría un trabajo para mí. Él aceptó, Markov fue a hablar con el presidente de la Academia y finalmente conseguí un puesto en el Instituto de Investigaciones Nucleares y, lo más importante, un permiso para vivir en la región de Moscú (aunque sin apartamento). Se suponía que habría de trabajar en la detección de neutrinos, pero el tema me pareció muy pronto un tanto aburrido y pronto lo cambié por una estrecha colaboración con Markov. De resultas de ello, volví a la Cosmología y lo primero que hice fue intentar resolver con Markov (que por entonces era ya octogenario, pero mantenía virgen su interés por la ciencia) el problema de la singularidad inicial, que sigue siendo uno de los mayores enigmas sin resolver de la Física. Finalmente acabamos ocupándonos de la función de onda del universo y de la interpretación de la mecánica cuántica.

Por consejo de Andréi Linde, escribí por entonces un par de artículos sobre aspectos técnicos de las perturbaciones cuánticas, pero a finales de los años ochenta esto no constituía mi interés primordial. Finalmente, la Unión Soviética desapareció como tal y llegó el momento de emigrar a Occidente (del que no me había preocupado lo más mínimo hasta entonces), porque la ciencia en Rusia estaba desmoronándose al mismo tiempo que lo hacía el país. En mi primera salida al extranjero conocí a Robert Brandenberger y, a pesar de mi inglés inexistente, conseguí convencerlo para escribir un artículo sobre perturbaciones cosmológicas en el que pensaba incluir todos los detalles técnicos que faltaban y que existían sólo en mis notas. Este artículo fue muy oportuno y en la actualidad constituye una de las principales referencias sobre el tema. Fue este artículo, aunque no mis otros trabajos pioneros sobre el tema, el que me dio a conocer y me ayudó a conseguir un puesto postdoctoral en Zúrich en 1992, donde pasé cinco años antes de conseguir una plaza permanente en Múnich en 1997. Esta parte de mi historia personal es mucho menos interesante, por lo que vamos a volver al universo y a explicar qué es lo que ha sucedido en la cosmología observacional durante los últimos treinta años, desde la invención de las perturbaciones cosmológicas cuánticas.

Aunque se produjo un progreso tecnológico muy sustancial con los telescopios, en 1990 seguíamos aproximadamente en la misma situación que antes en relación con los hechos experimentales, que podían tanto confirmar como refutar la teoría. La situación cambió drásticamente a comienzos de los años noventa. En 1992 se hicieron públicos los resultados de la misión espacial COBE (Explorador de Fondo Cósmico, por sus siglas en inglés) que, de acuerdo con las palabras del Comité Nobel, supusieron «el punto de partida de la Cosmología como una ciencia de precisión». Yo iría incluso más lejos: fue el comienzo de la Cosmología como ciencia. De hecho, en 1987, un equipo japonés-estadounidense encabezado por Andrew Lange, Paul Richards y Toshio Matsumoto había anunciado las fuertes desviaciones del espectro de cuerpo negro en el CMB (Fondo Cósmico de Microondas, por sus siglas en inglés) en un experimento con cohetes. Si estaban en lo cierto, esto significaría el final de la teoría del universo caliente. Todo el mundo estaba, por tanto, esperando ávidamente los resultados del COBE, que se suponía iban a decir la última palabra.

Después de más de diez años de preparativos, el satélite COBE fue lanzado el 18 de noviembre de 1989. Contenía un FIRAS (espectrofotómetro absoluto del infrarrojo lejano, por sus siglas en inglés) y un DMR (radiómetro diferencial de microondas, por sus siglas en inglés). El investigador principal del primer instrumento fue John Mather y el del segundo, George Smoot (ambos agraciados con el premio Nobel en 2006). Gracias a su ingenioso diseño, el FIRAS habría de medir el espectro del CMB con exquisita precisión, mientras que el DMR habría de ocuparse de las diminutas variaciones de la temperatura del CMB en el cielo debido a las inhomogeneidades primordiales que sobrevivieron tras la creación del universo. Los resultados de las mediciones fueron excepcionales. Se descubrió que el CMB posee el sistema térmico más perfecto a una temperatura de 2.726 grados Kelvin (un grado Kelvin equivale a 273 grados bajo cero). Cada vez que enseñé la curva de la medición en mis seminarios me quedo anonadado por su perfección. El origen primordial del CMB y el universo caliente se convirtieron en un hecho incontrovertible. El DMR hizo un descubrimiento más revolucionario aún, si cabe. Se detectaron por primera vez las tan esperadas

diminutas variaciones de la temperatura en diferentes direcciones del cielo, diferencias que resultaban ser del orden de 0,0001 grados Kelvin. Con ello obteníamos la imagen directa de las pequeñas inhomogeneidades en el universo cuando tenía sólo unos pocos cientos de miles de años. Utilizando esta imagen podía también reconstruirse fácilmente la imagen de las inhomogeneidades en el universo cuando era incluso mucho más joven, cuando su edad era mucho menor que una diminuta fracción de segundo. De la teoría de la gravedad de Einstein se sigue, de hecho, que las inhomogeneidades a escalas mayores que el tamaño de la región causal (esto es, la escala a que puede comunicarse información y que es igual a la velocidad de la luz multiplicada por un tiempo cosmológico) no se desarrollan en absoluto en un universo decelerado con una gravedad normal. Por tanto, independientemente de cuán tempranamente se produjeran, los «embriones de las galaxias» sobrevivieron completamente helados e inmutables a energías extremadamente altas hasta que el universo tuvo unos cientos de miles de años de antigüedad. ¡Este es el poder de la gravedad! Cuando se trata de la creación del conjunto del universo, el resto de las interacciones no importan demasiado. Los «embriones de la galaxia se despiertan y empiezan a desarrollarse» sólo cuando el universo es lo bastante viejo, cuando sabemos todo y, por tanto, podemos tener bajo control la evolución de los mismos.

Así pues, los resultados del COBE han demostrado que vivimos realmente en un universo caliente en expansión e incluso nos proporcionó la imagen de las «semillas» primordiales. De hecho, la resolución del DMR no era extremadamente buena y el «número de píxeles» en la fotografía no nos permitía distinguir la estructura detallada de los «embriones de las galaxias». Por tanto, aunque los resultados del COBE no contradecían las perturbaciones cuánticas, eran también congruentes con las restantes teorías, como, por ejemplo, las cuerdas y texturas cósmicas, e incluso con las perturbaciones entrópicas. La tarea principal consistía ahora en mejorar la resolución de las fotografías del CMB. Gracias al enorme progreso en la sensibilidad de los detectores, resultó posible medir las variaciones de la temperatura en globos e incluso desde el suelo. La principal desventaja de estas mediciones era que podían obtener sólo una pequeña parte de la fotografía de todo el universo tomada en las direcciones más limpias y transparentes del cielo, ya que para la fotografía completa siguen siendo necesarias las misiones espaciales, mucho más caras.

Dejemos por un momento las observaciones del CMB, a las que volveré enseguida, y hagamos un breve recorrido por los avances de la Astronomía que se produjeron en los años noventa. Se realizaron enormes progresos en la Astronomía extragaláctica observacional gracias a telescopios mucho más avanzados. En concreto, en 1990, el telescopio espacial Hubble, de 2,4 metros, fue puesto en órbita por el transbordador espacial de la NASA. En esos mismos años se construyeron los telescopios Keck en Hawái, así como el Gran Telescopio en Chile, con cuatro espejos de ocho metros cada uno, y muchos más. El uso de estos telescopios nos ha permitido incrementar extraordinariamente nuestro conocimiento del estado actual del universo. En los años ochenta ya se habían acumulado un gran número de datos, todos los cuales apuntaban a que debería haber Materia Oscura, que resultaba invisible para los telescopios. De lo contrario, resultaba sencillamente imposible comprender las curvas rotacionales de las galaxias y la dinámica de los racimos de galaxias. La principal pregunta pendiente era: ¿qué es lo que constituye la Materia Oscura? Desde el punto de vista de nuestra historia, el resultado crucial fue la constatación de que, fuera cual fuera la naturaleza

de la Materia Oscura, esta no era suficiente para hacer que el universo fuera plano. Si la cosa hubiera quedado así habría supuesto el final de la Cosmología Inflacionaria, que, como ya se ha señalado, predecía, entre otras cosas, la planitud del Universo a grandes escalas.

Afortunadamente, el ingrediente que faltaba para hacer el universo euclidiano fue finalmente descubierto en observaciones astronómicas. En 1998, dos grupos de investigación liderados por Saul Perlmutter (premio Nobel en 2011) y Brian Schmidt y Alan Riess (que recibieron también el premio Nobel en 2011), al observar supernovas a distancias muy grandes, constataron que el universo está expandiéndose de nuevo actualmente de manera acelerada. En otras palabras, descubrieron la existencia de lo que se conoce como Energía Oscura, que no es sino la que ya hemos descrito como fuente de la antigravedad. Esta Energía Oscura impregna todo el universo y por ello no puede observarse mediante las mismas técnicas que habían permitido descubrir la Materia Oscura. Esta Energía Oscura era el ingrediente que faltaba para hacer el universo plano y salvar la teoría de la Cosmología Inflacionaria. Finalmente, de entre los resultados astronómicos de los últimos años, me gustaría terminar citando las observaciones del Sloan Digital Survey, que ha recopilado datos sobre los desplazamientos al rojo de más de un millón de galaxias. Estos resultados observacionales han permitido que el Principio Cosmológico (que nos dice que no hay nada de especial en el lugar del universo en que nos encontramos) se asiente sobre bases muy sólidas.

Después de esta breve excursión por la astronomía, podemos ya retomar el hilo y volver a la historia de la radiación de fondo después del COBE. Al contrario de lo que ocurre con la Astronomía, las observaciones del fondo de radiación no adolecen de errores sistemáticos incontrolables. Gracias al enorme progreso en la sensibilidad de los detectores, ha llegado a ser posible medir las variaciones en la temperatura de la radiación de fondo con una precisión mucho mayor que la aportada por el satélite COBE. Dado que sabemos que las inhomogeneidades creadas por los embriones de las galaxias evolucionan como ondas de sonido, las diferencias de temperatura entre dos antenas debe depender de la separación angular y, en consecuencia, debe ser máxima para ciertas separaciones angulares (los picos Doppler). La distribución y la intensidad de estos picos dependen no sólo de la forma de las inhomogeneidades iniciales, sino también de la geometría del universo. Dos experimentos realizados en 1999, uno en Canadá (Saskatoon) y otro en Chile (TOCO), y dirigidos por Lyman Page, descubrieron que los picos estaban donde deberían estar. De este modo quedó establecido que era la Energía Oscura la que proporcionaba el ingrediente necesario para que el espacio sea plano. Más aún, el experimento BOOMERanG[13] detectó por primera vez el segundo pico Doppler, algo que fue esencial para determinar que la Energía Oscura constituía la mayor parte de nuestro universo.

En junio de 2001, la NASA envió al espacio la Sonda de Anisotropía de Microondas Wilkinson (WMAP, por sus siglas en inglés), un proyecto dirigido por Charles Bennett y Lyman Page, con una resolución treinta veces mejor que la del COBE. Los primeros resultados presentados en 2003 dejaban manifiestamente claro que existía una congruencia de las observaciones con la teoría de las perturbaciones cosmológicas dentro de la Cosmología Inflacionaria. Sin embargo, muchos escépticos seguían

dudando de la relevancia de los resultados. La última palabra la diría el satélite Planck. Aunque la misión Planck había sido decidida por la ESA (la Agencia Espacial Europea), al mismo tiempo que lo había sido WMAP, el satélite no se envió al espacio hasta mayo de 2009. El satélite Planck combinaba dos experimentos: uno liderado por el francés Jean-Loup Puget y el otro por el italiano Reno Mandolesi. Se trataba de un experimento cientos de veces más preciso que WMAP. Los resultados, la esperada foto, fue presentada el 21 de marzo de 2013 (y esta es la noticia con la que arrancaba este ensayo). Se descubrió, entre otras cosas, que el universo era plano con una precisión del 95,5 % y, lo que para mí era más importante, que nuestra predicción, hecha hacía más de treinta años, era correcta al 99,9999999 %. El índice espectral, ese número que he pedido al lector que memorizara, era de 0,96 más menos 0,007, frente al 0,96 que, junto con Chibisov, habíamos predicho en 1981. Las piezas del rompecabezas empezaban a encajar armoniosamente.

No hay duda de que vivimos en un universo donde la materia de la que estamos hechos no constituye tan solo más que un pequeño tanto por ciento del total. El resto es Materia Oscura y Energía Oscura. Al contrario que la Materia Oscura, que gravita, la Energía Oscura antigravita. No está claro cuál es hoy su papel, pero sabemos que, en el pasado remoto, una sustancia similar fue la responsable de la creación de nuestro universo a partir de la nada. Entiendo que todo esto puede sonar como una fantasía, pero la Naturaleza parece ser mucho más rica que cualquier fantasía imaginable. Los hechos hablan por sí solos y debemos aceptarlos tal como son.

Cuando aún era un niño y volvía una noche a casa en la que el cielo presentaba un aspecto extremadamente claro y nítido, pregunté a mi padre: «¿Qué es todo eso?». Mi padre me respondió: «Nadie lo sabe y nadie lo sabrá jamás». Si hoy viviera mi padre, creo que no estaría de acuerdo con él.

Viatcheslav Mukhanov es catedrático de Cosmología en la Ludwig-Maximilians-Universität de Múnich. Sus últimos libros son *Physical Foundations of Cosmology* (Cambridge, Cambridge University Press, 2005) y, con Serguéi Winitzki, *Introduction to Quantum Effects in Gravity* (Cambridge, Cambridge University Press, 2007). En 2013 le fue concedido, junto con Aleksei Starobinski, el prestigioso premio Gruber de Cosmología.

Traducción de César Gómez y Luis Gago

Este artículo ha sido escrito por Viatcheslav Mukhanov

especialmente para *Revista de Libros*

[1] El resultado del experimento Planck es la culminación de los esfuerzos de muchos cientos de físicos experimentales que habían estado trabajando muy duramente durante los casi veinte años anteriores. Planck es un experimento europeo, que fue aprobado por la Agencia Espacial Europea en 1996 y que se llevó a cabo, después de muchos trabajos preparatorios, en 2009. Durante varios años, radiodetectores muy sensibles estuvieron midiendo diminutas variaciones angulares de la temperatura de la radiación primordial producida por el Big Bang. Estas medidas nos proporcionan la información más prístina sobre el acto de la creación de nuestro mundo.

[2] De hecho, la primera no era tan improbable para mí. Por algunas razones, la dirección de mi escuela estaba empujándome al seno del «sistema jerárquico comunista». A los catorce años estaba ya al frente del Komsomol, la Unión Comunista de la Juventud, de un colegio que contaba con unos mil alumnos y yo era el miembro más joven del consejo del Partido Comunista de la ciudad. Con un intelecto ligeramente superior al de un mono, si se permanecía dentro de ese sistema, todos acababan alcoholizados.

[3] Para hacerse una idea de cómo era una pequeña ciudad de provincias en el centro de Rusia, recuerdo que casi todos los niños, incluido yo mismo, creíamos seriamente en las ideas comunistas. Estábamos convencidos, por ejemplo, de que en la Segunda Guerra Mundial los alemanes habían sido derrotados exclusivamente por los rusos y apenas habíamos oído hablar del Holocausto. El único misterio que recuerdo no poder resolver era por qué, si había sucedido realmente así, la mayor parte de Alemania seguía siendo capitalista. Esto muestra la eficacia de la propaganda soviética. No me sorprendí lo más mínimo, por tanto, cuando un buen amigo mío, nativo de una ciudad mucho mayor, me dijo en cierta ocasión que en la solicitud para obtener la nacionalidad estadounidense escribió que había creído en las ideas comunistas hasta los catorce años. La consecuencia fue que el proceso se demoró varios años, mientras que su mujer fue lo bastante inteligente como para escribir que había nacido siendo anticomunista y le concedieron la nacionalidad de inmediato. Afortunadamente, los valores humanos los aprendíamos no de la propaganda oficial, sino de la gran literatura rusa del siglo XIX.

[4] No fue hasta después de pasar varios años en el extranjero cuando me di cuenta de lo absurda que era la situación con todos estos permisos, teléfonos, etc., pero cuando me enfrenté a este problema me parecía una cosa absolutamente normal que había que solucionar. Vivíamos completamente aislados del resto del mundo y creo que la mayoría de la gente no se preocupaba demasiado de lo que sucedía en el resto del globo. Lo único que todos sabíamos gracias a la propaganda oficial era que Estados Unidos iba a atacar a la Unión Soviética y, por tanto, necesitábamos todos los misiles y bombas nucleares que fuéramos capaces de producir. Además, la mayoría de los rusos, especialmente de provincias, pensaban que toda Europa no era más que una pequeña esclava de Estados Unidos, de ahí que nadie se preocupara de Europa lo más mínimo.

[5] Curiosamente, casi todos ellos participaron y contribuyeron a la creación del armamento nuclear ruso.

[6] En muchos casos, los temas más populares son decididos por una o varias personas ascendidas por la comunidad al rango de «genios», a menudo sin que exista ninguna razón seria para ello.

[7] El tamaño de todo el universo observable es de alrededor de diez mil millones de años luz. Si en este universo tomáramos dos cubos relativamente pequeños, de un tamaño, por ejemplo, de diez millones de años luz, el número total de galaxias dentro de ellos puede ser diferente por un factor de dos o más, esto es, a estas escalas el universo es inhomogéneo. Sin embargo, si aumentáramos el tamaño de los cubos y les hiciéramos tener varios cientos de millones de años luz, entonces la hipótesis de la homogeneidad y la isotropía, también conocido como Principio Cosmológico, nos diría que el número total de galaxias dentro de estos dos cubos no puede variar significativamente y deben ser el mismo con gran precisión. Durante mucho tiempo, el Principio Cosmológico fue una hipótesis, que era razonable y no tan infrecuente y revolucionaria después de que Copérnico nos alejara del centro del mundo. Sin embargo, no se trataba más que de una especulación razonable y no se convirtió en un hecho hasta hace diez años aproximadamente, cuando los astrónomos pudieron medir por fin el corrimiento al rojo de millones de galaxias y, por tanto, obtener la imagen de su distribución en el espacio. Se descubrió que el universo es realmente homogéneo a escalas de unos pocos millones de años luz, mientras que presenta una estructura más compleja, semejante a una telaraña, a escalas más pequeñas: es decir, las galaxias prefieren seguir arracimándose formando racimos y superracimos de galaxias conectadas por filamentos, que a su vez están conectados por muros y entre los muros tenemos huecos casi vacíos sin galaxias.

[8] Es curioso que el hecho de la creación fuera considerado por algunos filósofos marxistas-leninistas rusos como una prueba de la existencia de Dios y, por tanto, el físico ruso Abraham Zelmanov, que publicó la primera parte del artículo sobre el universo en expansión en 1937, necesitó esperar hasta la muerte de Stalin en 1953 para publicar su segunda parte.

[9] Me intriga extraordinariamente cómo tanto Friedmann como Gamow, sin ningún indicio serio, pudieron

adivinar correctamente la masa y la temperatura del universo, respectivamente. Es como si algunos rusos tuvieran línea telefónica directa con Dios.

[10] Hoy puedo hacer estos cálculos como máximo en una semana, o incluso menos, y no acabo de entender qué es lo que me resultaba por entonces tan difícil. Quizá se trata de algo parecido a la orientación en una ciudad que visitas por primera vez y en la que nadie habla tu idioma.

[11] Desgraciadamente, siguiendo el consejo de Zeldóvich, enviamos este artículo para su publicación al *British Journal Monthly Notice* de la Royal Astronomical Society, donde se publicó dos años después con un retraso inusual. El motivo fue nuestro «inglés ruso», que fue completamente reescrito por un evaluador. Además, la comunicación entre Rusia e Inglaterra, con todos los obstáculos, se prolongó durante meses, que es más tiempo incluso que cien años en otros tiempos, cuando se utilizaban caballos para transportar el correo.

[12] BOOMERanG era un telescopio que volaba a una altitud superior a cuarenta kilómetros. El primer experimento fue un vuelo de prueba sobre Norteamérica en 1997. Los otros dos vuelos, en 1998 y 2003, se realizaron en la Antártida, donde el globo fue transportado por los vientos del vórtice polar alrededor del Polo Sur, regresando dos semanas después.