

MI VIDA EN LA FÍSICA



EL ORIGEN DEL
UNIVERSO

STEPHEN HAWKING

Traducción castellana de
Javier García Sanz

CRÍTICA
Barcelona

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual

(Art. 270 y siguientes del Código Penal)

Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos)
si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

Puede contactar con CEDRO a través de la web www.conlicencia.com
o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47

Título original:

My Life in Physics (2005)

The Origin of the Universe (2006)

Copyright © 2005 y 2006 by Stephen W. Hawking

© de la traducción: Javier García Sanz

Diseño de la cubierta: © 2010, Jorge Cabral

© 2010 de la presente edición para España y América:

CRÍTICA, S.L., Diagonal 662-664, 08034 Barcelona

e-mail: editorial@ed-critica.es

<http://www.ed-critica.es>

2010. Impreso y encuadernado en España



MI VIDA EN LA FÍSICA

OBTUVE MI PRIMER GRADO ACADÉMICO EN OXFORD. En mi examen final me preguntaron por mis planes futuros. Respondí que si me daban la máxima calificación iría a Cambridge, pero si obtenía una calificación menor me quedaría en Oxford. Me dieron la máxima. Llegué a Cambridge como estudiante graduado en octubre de 1962. Había solicitado trabajar con Fred Hoyle, el mayor defensor de la teoría del estado estacionario y el más famoso astrónomo británico de la época. Digo astrónomo porque en esa época apenas se consideraba la cosmología como un campo de estudio válido, pero era en ella donde quería realizar mi investigación, inspirado por lo que aprendí en un curso de verano al que asistí con un estudiante de Hoyle, Jayant Narlikar. Sin embargo, Hoyle ya tenía bastantes estudiantes, de modo que, con gran disgusto por mi parte, se me asignó a Dennis Sciama, alguien de quien yo no había oído hablar. Pero eso fue probablemente lo mejor que me pudo ocurrir. Hoyle estaba casi siempre fuera, apenas pasaba por el departamento, y no me hubiera prestado mucha atención. Por el contrario, Sciama, habitualmente en la universidad, se mostraba siempre disponible. Yo no estaba de acuerdo con muchas de sus ideas, en particular sobre el principio de Mach, pero eso me estimuló para elaborar mi propia imagen.

Cuando empecé a investigar, las dos áreas que parecían excitantes eran la cosmología y la física de partículas elementales. Las partículas elementales eran el campo activo y en continuo cambio que atraía a muchos de los mejores cerebros, mientras que la cosmología y la relatividad general se habían quedado atascadas y no habían avanzado desde la década de 1930. Feynman ha hecho un relato divertido de su asistencia a la conferencia sobre relatividad

general y gravitación en Varsovia en 1962. En una carta a su mujer decía, «No estoy sacando nada de la reunión. No estoy aprendiendo nada. Éste no es un campo activo porque no hay experimentos, y por ello pocos de los mejores cerebros trabajan en él. El resultado es que hay aquí un montón de pasmarotes (126) y eso no es bueno para mi tensión arterial. ¡Recuérdame que no vaya a más conferencias sobre gravedad!»

Por supuesto, yo no sabía todo esto cuando empecé mi dedicación. Pero pensaba que en esa época la investigación sobre partículas elementales se parecía mucho a la botánica. La electrodinámica cuántica, la teoría de la luz y los electrones que gobierna la química y la estructura de los átomos, había sido desarrollada por completo en las décadas de 1940 y 1950. La atención se había desplazado ahora hacia las fuerzas nucleares fuerte y débil entre partículas en el núcleo de un átomo, pero teorías de campos similares a la electrodinámica no parecían funcionar aquí. De hecho, la escuela de Cambridge, en particular, sostenía que no había una teoría de campos subyacente. En su lugar, todo estaría determinado por la unitariedad, es decir, la conservación de la probabilidad, y por ciertas pautas características en la dispersión de partículas. Visto retrospectivamente, resulta sorprendente que se pensara que esta aproximación fuera a funcionar, pero recuerdo el desprecio que despertaron los primeros intentos de teorías de campo unificado para las fuerzas nucleares débiles. Sin embargo, son estas teorías de campos las que se recuerdan, mientras que la matriz S analítica ha sido olvidada. Me alegro de no haber empezado mi investigación en partículas elementales. Nada de mi trabajo en ese período habría sobrevivido.

Por el contrario, cosmología y gravitación eran en esa época campos olvidados en espera de un desarrollo. A diferencia de lo que sucedía con las partículas individuales, había una teoría bien definida, la teoría de la relatividad general, pero se pensaba que era tre-

mendamente difícil. La gente se ponía tan contenta cuando encontraba cualquier solución de las ecuaciones del campo, que no se preguntaba qué significado físico tenía, si es que tenía alguno. Ésta era la vieja escuela de relatividad general que encontró Feynman en Varsovia. Pero la conferencia de Varsovia marcó también el comienzo del renacimiento de la relatividad general, aunque se le puede perdonar a Feynman que no lo reconociera en ese momento.

Entonces entró en el campo una nueva generación y aparecieron nuevos centros de relatividad general. Dos de éstos fueron de particular importancia para mí. Uno estaba en Hamburgo bajo la dirección de Pascual Jordan. Nunca lo visité, pero admiraba sus elegantes artículos, que tanto contrastaban con el confuso trabajo previo en relatividad general. El otro centro estaba en el King's College, en Londres, bajo la dirección de Hermann Bondi, otro proponente de la teoría del estado estacionario aunque no comprometido ideológicamente con ella, como Hoyle.

Yo no había estudiado muchas matemáticas en la escuela ni en los muy fáciles cursos de física en Oxford, de modo que Sciamia me sugirió que trabajara en astrofísica. Pero, ya que no me dejaban trabajar con Hoyle, no iba a dedicarme además a algo tan aburrido como la rotación de Faraday. Yo había ido a Cambridge a hacer cosmología, y estaba decidido a hacer cosmología, así que leía viejos libros de texto sobre relatividad general y me desplazaba a Londres cada semana con otros tres estudiantes para asistir a conferencias en el King's College. Seguía las palabras y las ecuaciones, pero no captaba realmente la esencia del tema. Además, me habían diagnosticado una enfermedad neuronal motora, o ELA (esclerosis lateral amiotrófica), y tenía que hacerme a la idea de que no iba a tener tiempo para acabar mi doctorado. Luego, repentinamente, hacia el final de mi segundo año de investigación, las cosas mejoraron. Mi enfermedad no avanzaba y mi trabajo cuajaba, así que empecé a hacer progresos.

Sciama estaba muy interesado en el principio de Mach, la idea de que los objetos deben su inercia a la influencia de toda la materia en el universo. Él me sugirió que trabajara en esto, pero yo pensaba que sus formulaciones del principio de Mach no estaban bien definidas. Sin embargo, él me enseñó algo similar con respecto a la luz, la denominada electrodinámica de Wheeler-Feynman. Ésta decía que electricidad y magnetismo eran simétricos con respecto al tiempo. Sin embargo, cuando se encendía una lámpara, era la influencia de toda la materia en el universo la que causaba que las ondas luminosas viajaran desde la lámpara hacia fuera, en lugar de venir desde el infinito y terminar en la lámpara. Para que funcionase la electrodinámica de Wheeler-Feynman era necesario que toda la luz que salía de la lámpara fuera absorbida por otra materia. Esto sucedería en un universo en estado estacionario en el que la densidad de materia permaneciera constante, pero no en un universo Big Bang en el que la densidad disminuiría a medida que éste se expandiera. Se afirmaba que esto demostraba, si es que era necesario hacerlo de nuevo, que vivimos en un universo en estado estacionario. Hubo una conferencia sobre la electrodinámica de Wheeler-Feynman y la flecha del tiempo en Cornell en 1963. Feynman estaba tan disgustado por los sinsentidos que se dijeron sobre la flecha del tiempo que se negó a que su nombre apareciera en las actas. Se le mencionaba como Señor X, pero todo el mundo sabía quién era X.

Pero me encontré con que Hoyle y Narlikar ya habían desarrollado la electrodinámica de Wheeler-Feynman en universos en expansión y luego habían pasado a formular una nueva teoría de la gravedad simétrica con respecto al tiempo. Hoyle reveló la teoría en una reunión de la Royal Society en 1964. Yo estaba en la conferencia, y en el turno de preguntas dije que la influencia de toda la materia en un universo en estado estacionario haría las masas infinitas. Hoyle me preguntó que por qué decía eso, y yo respondí que lo había

calculado. Todos pensaban que lo había hecho mentalmente durante la conferencia, pero lo cierto es que yo compartía un despacho con Narlikar y había visto un borrador del artículo. Hoyle se enfadó. Él estaba tratando de establecer su propio instituto y amenazaba con unirse a la fuga de cerebros hacia América si no obtenía los fondos necesarios. Creía que estaba allí para sabotear sus planes. Sin embargo, él consiguió su instituto y más tarde me dio un puesto, de modo que no guardaba ningún resentimiento hacia mí.

La gran pregunta en cosmología a comienzos de la década de 1960 era, ¿tuvo el universo un comienzo? Muchos científicos se oponían instintivamente a la idea, porque pensaban que un momento de creación sería un lugar en donde la ciencia dejaba de ser válida. Habría que apelar a la religión y a la mano de Dios para determinar cómo empezó el universo. Por ello se propusieron dos escenarios alternativos. Uno era la teoría del estado estacionario, en la que a medida que el universo se expandía, se creaba continuamente nueva materia para mantener la densidad constante de promedio. La teoría del estado estacionario nunca tuvo una base teórica muy fuerte porque requería un campo de energía negativa para crear la materia. Esto lo habría hecho inestable, con una desbocada producción de materia y energía negativa. Pero, como teoría científica, tenía el gran mérito de hacer predicciones precisas que podían ponerse a prueba mediante observaciones. Ya en 1963 la teoría del estado estacionario estaba en dificultades. El grupo de radioastronomía de Martin Ryle en el Cavendish hizo una búsqueda de radiofuentes débiles. Hallaron que las fuentes estaban distribuidas en el cielo de forma bastante uniforme. Esto indicaba que probablemente estaban fuera de nuestra galaxia porque de no ser así estarían concentradas a lo largo de la Vía Láctea. Pero la gráfica del número de fuentes frente a la intensidad de la fuente no estaba de acuerdo con la predicción de la teoría del estado estacionario. Ha-

bía demasiadas fuentes débiles que indicaban que la densidad de fuentes era más alta en el pasado distante. Hoyle y sus defensores propusieron explicaciones cada vez más retorcidas de las observaciones, pero el clavo final en el ataúd de la teoría del estado estacionario se puso en 1965 con el descubrimiento de un débil fondo de radiación de microondas. Esto no podía explicarse en la teoría del estado estacionario, por mucho que Hoyle y Narlikar lo intentaran desesperadamente. Fue una suerte que no llegara a ser estudiante de Hoyle, porque habría tenido que defender el estado estacionario.

El fondo de microondas indicaba que el universo había tenido una etapa densa y caliente en el pasado, pero no demostraba que ésta fuera el comienzo del universo. Se podría imaginar que el universo había tenido una fase contractiva previa, y que había rebotado de contracción a expansión a una densidad alta pero finita. Ésta era evidentemente una pregunta fundamental, precisamente lo que yo necesitaba para completar mi tesis doctoral.

La gravedad comprime la materia, pero la rotación la disgrega. Así que mi primera pregunta era, ¿puede hacer la rotación que el universo rebote? Junto con George Ellis pude demostrar que la respuesta era No, si el universo era espacialmente homogéneo, es decir, si era igual en todos los puntos del espacio. Sin embargo, dos rusos, Lifshitz y Khalatnikov, afirmaban que habían demostrado que una contracción general sin simetría exacta llevaría siempre a un rebote, en el que la densidad permanecía finita. Este resultado era muy conveniente para el materialismo dialéctico marxista-leninista, porque evitaba preguntas embarazosas sobre la creación del universo. Por ello se convirtió en un artículo de fe para los científicos soviéticos.

Lifshitz y Khalatnikov eran miembros de la vieja escuela de relatividad general. Es decir, ellos planteaban todo un sistema de ecuaciones y trataban de obtener una solución. Pero no estaba claro que la solución que encontraran fuera la más general. Sin embar-

go, Roger Penrose introdujo un nuevo enfoque que no requería resolver explícitamente las ecuaciones del campo, sino sólo ciertas propiedades generales tales como que la energía sea positiva y la gravedad atractiva. Penrose dio un seminario en el King's College, en Londres, en enero de 1965. Yo no estuve en el seminario pero supe de él por Brandon Carter, con quien compartía un despacho en el entonces nuevo edificio del DAMTP en Silver Street. Al principio no podía entender cuál era la idea. Penrose había demostrado que una vez que una estrella moribunda se hubiera contraído hasta un cierto radio, habría inevitablemente una singularidad, un punto en donde el espacio y el tiempo llegan a un final. Por supuesto, pensaba yo: ya sabíamos que nada podía impedir que una estrella fría masiva colapse bajo su propia gravedad hasta que alcanza una singularidad de densidad infinita. Pero las ecuaciones sólo habían sido resueltas para el caso del colapso de una estrella perfectamente esférica, y una estrella real no es exactamente esférica. Si Lifshitz y Khalatnikov tenían razón, las desviaciones respecto de la simetría esférica crecerían a medida que la estrella colapsara y harían que diferentes partes de la estrella no se encontraran con otras y se evitara una singularidad de densidad infinita. Pero Penrose demostró que estaban equivocados. Pequeñas desviaciones de la simetría esférica no impedirían la singularidad.

Yo me di cuenta de que podían aplicarse argumentos similares a la expansión del universo. En este caso, pude probar que había singularidades en donde el espaciotiempo tenía un comienzo. Así que, una vez más, Lifshitz y Khalatnikov estaban equivocados. La relatividad general predecía que el universo debería tener un comienzo, un resultado que no pasó desapercibido para la Iglesia.

Los teoremas de singularidad que demostramos Penrose y yo requerían la hipótesis de que el universo tuviera una superficie de Cauchy, es decir, una superficie que corta una vez, y sólo una, a

cada curva de tipo tiempo. Por consiguiente, era posible que nuestros primeros teoremas de singularidad demostraran simplemente que el universo no tenía una superficie de Cauchy. Aunque esto tenía interés, su importancia no era comparable con el hecho de que el tiempo tenga un comienzo o un final. Por ello me propuse demostrar teoremas de singularidad que no requirieran la hipótesis de una superficie de Cauchy. En los cinco años siguientes, Roger Penrose, Bob Geroch y yo desarrollamos la teoría de la estructura causal en relatividad general. Era una hermosa sensación la de tener todo un campo prácticamente para nosotros solos. ¡Qué distinto de la física de partículas, donde la gente se atropellaba por conseguir la última idea! (Siguen así.)

Hasta 1970 mi interés principal estaba en la singularidad Big Bang de la cosmología, y no tanto en las singularidades que Penrose había demostrado que ocurrirían en estrellas que colapsan. Sin embargo, en 1967, Werner Israel obtuvo un resultado importante. Demostró que a menos que el remanente de una estrella que colapsa fuera exactamente esférico, la singularidad que contenía estaría desnuda, es decir, sería visible para observadores externos. Esto habría significado que el fracaso de la relatividad general en la singularidad de una estrella que colapsa destruiría nuestra capacidad para predecir el futuro del resto del universo.

Al principio, muchos, incluido el propio Israel, pensaron que esto implicaba que puesto que las estrellas reales no son esféricas, su colapso daría lugar a singularidades desnudas y acabaría con la predecibilidad. Sin embargo, Roger Penrose y John Wheeler propusieron una interpretación diferente: que hay Censura Cósmica. Ésta dice que la Naturaleza es recatada y oculta las singularidades en agujeros negros donde no pueden ser vistas. Yo tenía en la puerta de mi despacho en DAMTP una pegatina que decía «los agujeros negros no están a la vista». Esto irritaba tanto al director

del departamento que *arregló* mi elección para la Cátedra Lucasianna, me trasladó a un despacho mejor a cuenta de ello y arrancó personalmente el ofensivo cartel del viejo despacho.

Mi trabajo sobre agujeros negros empezó con un momento Eureka en 1970, unos días después del nacimiento de mi primera hija, Lucy. Mientras estaba en la cama me di cuenta de que podía aplicar a los agujeros negros la teoría de la estructura causal que había desarrollado para teoremas de singularidad. En particular, el área del horizonte, la frontera del agujero negro, crecería siempre. Cuando dos agujeros negros colisionan y se fusionan, el área del agujero negro final es mayor que la suma de las áreas de los agujeros originales. Esta y otras propiedades que descubrimos Jim Bardeen, Brandon Carter y yo sugerían que el área era como la entropía de un agujero negro. Esto sería una medida de cuántos estados podría tener un agujero negro en su interior, para una misma apariencia exterior. Pero el área no podía ser realmente la entropía, porque, como todo el mundo sabía, los agujeros negros eran completamente negros y no podían estar en equilibrio con la radiación térmica.

Fue un período excitante que culminó en la escuela de verano de Les Houches en 1972, en donde resolvimos muchos de los problemas importantes en la teoría de los agujeros negros. Esto era antes de que hubiera evidencia observacional de agujeros negros, lo que demuestra que Feynman se equivocaba cuando decía que un campo activo tiene que estar impulsado por el experimento. Lo mismo sucede con la teoría M. El problema que nunca se resolvió era demostrar la hipótesis de Censura Cósmica, aunque sí fallaron varios intentos de refutarla. Es fundamental para todo trabajo sobre agujeros negros, de modo que tengo un gran interés en que sea cierta. Por ello he hecho una apuesta con Kip Thorne y John Preskill. Es difícil que la gane, y bastante posible que la pierda: bastaría con encontrar un contraejemplo con una singularidad desnuda. De he-

cho, ya he perdido una antigua versión de la apuesta por no ser suficientemente cuidadoso en el enunciado. Ellos no quedaron contentos con la camiseta que les ofrecí en compensación.

Tuvimos tanto éxito con la teoría de la relatividad general clásica que me encontraba sin saber qué hacer en 1973 tras la publicación con George Ellis de *La estructura a gran escala del espacio-tiempo*. Mi trabajo con Penrose había demostrado que la relatividad general dejaba de ser válida en las singularidades. Así que era obvio que el paso siguiente sería combinar la relatividad general, la teoría de lo muy grande, con la teoría cuántica, la teoría de lo muy pequeño. Yo no tenía formación en la teoría cuántica, y el problema de la singularidad parecía en esa época demasiado difícil para un asalto frontal. Así que, como ejercicio de calentamiento, consideré cómo se comportarían las partículas y los campos gobernados por la teoría cuántica cerca de un agujero negro. En particular, me pregunté: ¿se pueden tener átomos en los que el núcleo sea un agujero negro primordial, formado en el universo primitivo?

Para responderla, estudié cómo serían dispersados los campos cuánticos por un agujero negro. Esperaba que parte de una onda incidente sería absorbida, y el resto sería dispersada. Pero para mi gran sorpresa, hallé que parecía haber emisión desde el agujero negro. Al principio pensé que debía de existir un error en mis cálculos. Pero lo que me convenció de que era real fue que la emisión era exactamente la que se requería para identificar el área del horizonte con la entropía de un agujero negro. Me gustaría que esta sencilla fórmula figure en mi lápida.

El trabajo con Jim Hartle, Gary Gibbons y Malcolm Perry reveló la razón profunda para esta fórmula. La relatividad general puede combinarse con la teoría cuántica de una manera elegante si se reemplaza el tiempo ordinario por un tiempo imaginario. He tratado de explicar el tiempo imaginario en otras ocasiones, con éxito diverso.

Creo que es el adjetivo, imaginario, lo que lo hace tan confuso. Es más fácil si se adopta la visión positivista de que una teoría es simplemente un modelo matemático. En este caso, el modelo matemático tiene un signo menos cuando quiera que el tiempo aparezca dos veces. La aproximación euclidiana a la gravedad cuántica, basada en el tiempo imaginario, fue utilizada por primera vez en Cambridge. Encontró mucha resistencia, pero hoy tiene aceptación general.

La radiación de un agujero negro llevará energía, de modo que el agujero negro perderá masa y se contraerá. Finalmente, parece que el agujero negro se evaporará por completo y desaparecerá. Esto planteaba un problema que incidía en el corazón de la física. Mi cálculo demostraba que la radiación era exactamente térmica y aleatoria, como tiene que ser si el área del horizonte va a ser la entropía del agujero negro. Entonces, ¿cómo podía la radiación saliente llevar toda la información sobre lo que formó el agujero negro? Pero si la información se pierde, esto es incompatible con la mecánica cuántica. Esta paradoja se ha discutido durante treinta años sin muchos avances, hasta que yo encontré lo que creo que es su solución. La información no se pierde, pero no vuelve en una forma útil. Es como quemar una enciclopedia. La información no se pierde, pero es muy difícil de leer. De hecho, Kip Thorne y yo hicimos una apuesta con John Preskill sobre la paradoja de la información. Yo le di a John una enciclopedia del béisbol. Quizá debería haberle dado sólo las cenizas.

Entre 1970 y 1980 trabajé sobre todo en agujeros negros y en la aproximación euclidiana a la gravedad cuántica. Pero las sugerencias de que el universo primitivo había pasado por un período de expansión inflacionaria renovaron mi interés en la cosmología. Los métodos euclidianos eran la forma obvia de describir fluctuaciones y transiciones de fase en un universo inflacionario. Celebramos un taller Nuffield en Cambridge en 1982, en el que participa-

ron todos los actores importantes en el campo. En esta reunión dejamos establecida buena parte de nuestra imagen actual de la inflación, incluidas las sumamente importantes fluctuaciones de densidad que dan lugar a la formación de galaxias y, con ello, a nuestra existencia. Esto era diez años antes de que se observaran las fluctuaciones en el fondo de microondas, de modo que también en gravedad la teoría iba por delante del experimento.

La idea que se tenía de la inflación en 1982 era que el universo empezó con una singularidad Big Bang. Se suponía que, cuando el universo se expandía, entraba de algún modo en un estado estacionario. Yo pensaba que esto era insatisfactorio porque todas las ecuaciones dejarían de ser válidas en la singularidad. Pero a menos que uno supiera qué salió de la singularidad inicial, no podría calcular cómo evolucionaría el universo. La cosmología no tendría ningún poder predictivo.

Tras el taller en Cambridge pasé el verano en el Instituto de Física Teórica de Santa Bárbara, que acababa de fundarse. Vivíamos en casas de estudiantes y yo iba al instituto en una silla de ruedas eléctrica alquilada. Recuerdo a mi hijo menor Tim, de tres años de edad, observando la puesta de sol en las montañas y diciendo, «es un gran país».

Durante mi estancia en Santa Barbara hablé con Jim Hartle sobre cómo aplicar la aproximación euclidiana a la cosmología. Según De Witt y otros, el universo debería describirse por una función de onda que obedeciera a la ecuación de Wheeler-De Witt. Pero ¿qué era lo que distinguía a la solución particular de la ecuación que representa a nuestro universo? Según la aproximación euclidiana, la función de onda del universo viene dada por una suma de Feynman sobre una cierta clase de historias en tiempo imaginario. Puesto que el tiempo imaginario se comporta como otra dirección en el espacio, las historias en el tiempo imaginario

pueden ser superficies cerradas, como la superficie de la Tierra, sin principio ni fin. Jim y yo decidimos que ésta era la elección de clase más natural; de hecho, la única elección natural. Habíamos soslayado la dificultad científica y filosófica del comienzo del tiempo convirtiéndolo en una dirección en el espacio.

Muchos físicos teóricos han sido formados en física de partículas antes que en relatividad general. Por ello se han interesado más en cálculos de lo que ellos observan en los aceleradores de partículas que en cuestiones sobre el comienzo y el final del tiempo. La idea era que si podían encontrar una teoría que, en principio, les permitiera calcular la dispersión de partículas con precisión arbitraria, todo lo demás se seguiría de algún modo. En 1985 se proclamó que la teoría de cuerdas era esta teoría final, pero en años posteriores se vio que la situación era más complicada y más interesante. Parece que hay una red llamada teoría M. Todas las teorías en la red de la teoría M pueden considerarse como aproximaciones a una misma teoría subyacente, en límites diferentes. Ninguna de las teorías permite cálculos de dispersión con precisión arbitraria, y ninguna puede considerarse como la teoría fundamental de la que las demás son reflejo. En lugar de ello, todas deberían considerarse como teorías efectivas, válidas en límites diferentes. Los teóricos de cuerdas llevan mucho tiempo utilizando este término, teoría efectiva, como una descripción peyorativa de la relatividad general. Sin embargo, la teoría de cuerdas es igualmente una teoría efectiva, válida en el límite en que la membrana de la teoría M está enrollada en un cilindro de radio pequeño. Decir que la teoría de cuerdas es sólo una teoría efectiva no es muy popular, pero es cierto.

Puesto que se soñaba con una teoría que permitiera cálculos de dispersión con precisión arbitraria, la gente rechazaba la relatividad general cuántica y la supergravedad con el argumento de que no eran renormalizables. Esto significa que son necesarias sustrac-

ciones indeterminadas en cada orden de aproximación para obtener respuestas finitas. De hecho, no es sorprendente que una simple teoría de perturbaciones deje de ser válida en la gravedad cuántica. No se puede considerar un agujero negro como una perturbación del espacio plano.

He hecho recientemente algún esfuerzo por hacer la supergravedad renormalizable, sumando a la acción términos en derivadas más altas. Esto introduce aparentemente fantasmas, estados con probabilidad negativa. Sin embargo, he hallado que esto es una ilusión. Nunca se puede preparar un sistema en un estado de probabilidad negativa. Pero la presencia de fantasmas significa que no se puede predecir con precisión arbitraria. Si se puede aceptar esto, se puede vivir felizmente con fantasmas.

Esta aproximación con derivadas más altas y fantasmas permite reavivar el modelo de inflación original de Starobinski y otros rusos. En éste, la expansión inflacionaria del universo está impulsada por los efectos cuánticos de un gran número de campos de materia. Basado en la propuesta de ausencia de frontera, yo imagino el origen del universo como la formación de burbujas de vapor en agua hirviendo. Las fluctuaciones cuánticas llevan a la creación espontánea de universos minúsculos a partir de la nada. La mayoría de los universos colapsan a la nada, pero algunos que alcanzan un tamaño crítico se expandirán de una manera inflacionaria y formarán galaxias y estrellas, y quizá seres como nosotros.

En conjunto, ha sido un tiempo glorioso para vivir y hacer investigación en física teórica. Nuestra imagen del universo ha cambiado mucho en los últimos cuarenta años, y me sentiré feliz si se considera que he contribuido a ello. Quiero compartir mi excitación y mi entusiasmo. No hay nada como el momento Eureka de descubrir algo que nadie sabía antes. No voy a compararlo con el sexo, pero dura más.



EL ORIGEN DEL UNIVERSO

SEGÚN EL PUEBLO BOSHONGO DEL ÁFRICA CENTRAL, en el comienzo solo había oscuridad, agua y el gran dios Bumba. Un día Bumba, presa de un dolor de estómago, vomitó el Sol. El Sol secó parte del agua, y apareció la Tierra. Todavía con dolores, Bumba vomitó la Luna, las estrellas y luego algunos animales: el leopardo, el cocodrilo, la tortuga y, finalmente, el hombre.

Este mito de creación, como muchos otros, trata de responder a preguntas que todos nos hacemos. ¿Por qué estamos aquí? ¿De dónde venimos? La respuesta que se solía dar era que los seres humanos tenían un origen relativamente reciente, porque resultaba obvio, incluso en tiempos muy tempranos, que la especie humana estaba mejorando en conocimientos y tecnología. Por tanto, no podía remontarse muy lejos, pues de lo contrario habría avanzado aún más. Por ejemplo, según el obispo Usher, el Libro del Génesis situaba la creación del mundo a las 9 de la mañana del 27 de octubre del año 4004 a. C. Por el contrario, el entorno físico, como las montañas o los ríos, cambia muy poco durante el tiempo de una vida humana. Por ello se pensaba que era un fondo constante que, o bien había existido siempre como un paisaje vacío, o había sido creado al mismo tiempo que los seres humanos. Sin embargo, no todos se sentían felices con la idea de que el universo tuviera un comienzo.

Por ejemplo, Aristóteles, el más famoso de los filósofos griegos, creía que el universo había existido siempre. Algo eterno es más perfecto que algo creado. Sugirió que la razón de que viéramos un progreso era que los diluvios, u otros desastres naturales, habían hecho retroceder la civilización a sus inicios una y otra vez. El mo-

tivo para creer en un universo eterno era el deseo de evitar la invocación de una intervención divina que creaba el universo y lo ponía en marcha. Recíprocamente, quienes creían que el universo tuvo un principio, lo utilizaban como argumento a favor de la existencia de Dios como causa primera, o primer motor, del universo.

Si uno creía que el universo tuvo un principio, la pregunta obvia era, ¿qué sucedió con anterioridad a ese comienzo? ¿Qué estaba haciendo Dios antes de hacer el Mundo? ¿Estaba Él preparando el Infierno para la gente que se hiciera tales preguntas? El problema de si el universo tuvo o no un principio fue una gran preocupación para el filósofo alemán Immanuel Kant. Él pensaba que en ambos casos había contradicciones lógicas, o antinomias. Si el universo tuvo un principio, ¿por qué esperó un tiempo infinito antes de comenzar? Él llamaba a esto, la tesis. Por el contrario, si el universo había existido siempre, ¿por qué necesitó un tiempo infinito para alcanzar la fase actual? Llamaba a esto la antítesis. Tanto tesis como antítesis dependían de la hipótesis que hacía Kant, y casi todos los demás, de que el tiempo era Absoluto. Es decir, iba desde el infinito pasado al infinito futuro, independientemente de cualquier universo que pudiera o no pudiera existir en este fondo. Ésta es aún la imagen que tienen hoy muchos científicos en la mente.

Sin embargo, en 1915 Einstein introdujo su revolucionaria Teoría de la Relatividad General. En ésta, espacio y tiempo ya no eran Absolutos, ya no eran un fondo fijo para los sucesos. En su lugar, eran magnitudes dinámicas que estaban conformadas por la materia y la energía en el universo. Sólo estaban definidas dentro del universo, de modo que no tenía sentido hablar de un tiempo antes del principio del universo. Sería como preguntar por un punto al sur del Polo Sur. No está definido. Si el universo fuera esencialmente invariable en el tiempo, como era creencia general antes de la década de 1920, no habría razón para que el tiempo no estuviera

definido en un pasado arbitrariamente lejano. Cualquier denominado principio del universo sería artificial, en el sentido de que se podría extender la historia hacia atrás a tiempos anteriores. Así, podría ser que el universo se hubiera creado el año pasado, pero con todos los recuerdos y pruebas físicas que le hicieran parecer mucho más viejo. Esto plantea profundas preguntas filosóficas sobre el significado de la existencia. Yo las trataré adoptando lo que se denomina un enfoque positivista. La idea es que interpretamos lo que entra en nuestros sentidos en términos de un modelo que hacemos del mundo. Uno no puede preguntar si el modelo representa realidad, sólo puede preguntar si funciona. Un modelo es un buen modelo si, primero, interpreta un amplio rango de observaciones en términos de un modelo sencillo y elegante. Y segundo, si el modelo hace predicciones precisas que pueden ser puestas a prueba y posiblemente refutadas mediante observación.

En términos del enfoque positivista se pueden comparar dos modelos del universo: uno en el que el universo fue creado el año pasado y otro en que el universo existía desde mucho antes. El modelo en el que el universo existía desde hace mucho más de un año puede explicar cosas tales como gemelos idénticos que tienen una causa común hace más de un año. Por el contrario, el modelo en que el universo fue creado el año pasado no puede explicar tales sucesos. De modo que el primer modelo es mejor. Uno no puede preguntar si el universo existía realmente hace más de un año o simplemente lo parecía. En el enfoque positivista no hay diferencia. En un universo invariable no habría ningún punto de partida natural. Sin embargo, la situación cambió radicalmente cuando Edwin Hubble empezó a hacer observaciones con el telescopio de cien pulgadas en el Monte Wilson en la década de 1920.

Hubble halló que las estrellas no están uniformemente distribuidas en el espacio, sino agrupadas en enormes conjuntos llama-

dos galaxias. Midiendo la luz procedente de las galaxias, Hubble pudo determinar sus velocidades. Él esperaba que hubiera tantas galaxias moviéndose hacia nosotros como alejándose de nosotros. Esto es lo que sucedería en un universo invariable en el tiempo. Pero para su sorpresa, Hubble halló que casi todas las galaxias se estaban alejando de nosotros. El universo no era invariable en el tiempo como todos habían pensado hasta entonces. Se estaba expandiendo. Las distancias entre galaxias distantes estaban aumentando con el tiempo.

La expansión del universo fue uno de los descubrimientos intelectuales más importantes del siglo xx (de cualquier siglo). Transformó el debate sobre si el universo tuvo un principio. Si las galaxias se están alejando ahora, deben de haber estado más juntas en el pasado. Si su velocidad hubiera sido constante, todas habrían estado amontonadas hace unos 15.000 millones de años. ¿Fue esto el inicio del universo? Muchos científicos seguían sin sentirse a gusto con que el universo tuviera un comienzo, porque ello parecía implicar que la física dejaba de ser válida. Habría que invocar a un agente externo, que por conveniencia se puede llamar Dios, para determinar cómo empezó el universo. Por eso propusieron teorías en las que el universo se estaba expandiendo en el tiempo presente, pero no había tenido un principio. Una de éstas era la teoría del Estado Estacionario, propuesta por Bondi, Gold y Hoyle en 1948.

La idea de la teoría del Estado Estacionario era que, a medida que las galaxias se separaran, se formarían nuevas galaxias a partir de materia que se suponía que se estaba creando continuamente por todo el espacio. El universo habría existido siempre y habría parecido igual en todo momento. Esta última propiedad tenía la gran virtud, desde un punto de vista positivista, de ser una predicción precisa que podía ser puesta a prueba mediante observación. El grupo de radioastronomía de Cambridge, dirigido por Martin Ryle, hizo una ex-

ploración de radiofuentes débiles a comienzos de la década de 1960. Éstas estaban distribuidas de manera bastante uniforme a lo largo del cielo, lo que indicaba que la mayoría de las fuentes están fuera de nuestra galaxia. Las fuentes más débiles estarían, por término medio, más alejadas. La teoría del Estado Estacionario predecía una forma para la gráfica del número de fuentes frente a la intensidad de la fuente. Pero las observaciones mostraron más fuentes débiles de las predichas, lo que indicaba que la densidad de fuentes era más alta en el pasado. Esto contradecía la hipótesis básica de la teoría del Estado Estacionario, que todo era constante en el tiempo. Por esta, y otras razones, la teoría del Estado Estacionario fue abandonada.

Otro intento de evitar que el universo tuviera un principio fue la sugerencia de que hubo una fase contractiva previa pero, debido a la rotación y a irregularidades locales, no toda la materia habría caído al mismo punto. En su lugar, las diferentes partes de la materia no se habrían encontrado y el universo se habría expandido de nuevo sin que la densidad llegara a hacerse infinita. Dos rusos, Lifshitz y Khalatnikov, pretendían haber demostrado que una contracción general sin simetría exacta llevaría siempre a un rebote sin que la densidad llegara a hacerse finita. El resultado era muy conveniente para el materialismo dialéctico marxista-leninista, porque evitaba preguntas embarazosas sobre la creación del universo. Por ello se convirtió en un artículo de fe para los científicos soviéticos.

Cuando Lifshitz y Khalatnikov publicaron esto yo era un estudiante de investigación de 21 años en busca de algo con que completar mi tesis doctoral. Yo no me creía su supuesta demostración, y con Roger Penrose me propuse desarrollar nuevas técnicas matemáticas para estudiar la cuestión. Demostramos que el universo no podía rebotar. Si la Teoría de la Relatividad de Einstein es correcta, habrá una singularidad, un punto de densidad y curvatura espaciotemporal infinita, donde el tiempo tiene un principio. Una

prueba observacional para confirmar la idea de que el universo tuvo un comienzo muy denso llegó en octubre de 1965, pocos meses después de mi primer teorema de singularidad, con el descubrimiento de un débil fondo de microondas por todo el espacio. Estas microondas son similares a las del horno microondas que tienen ustedes en casa, pero mucho menos potentes. Sólo calentarían su pizza a $-271,3$ °C, lo que no sirve de mucho para descongelarla, ya no digamos para cocinarla. Ustedes mismos pueden observar realmente estas microondas. Sintonicen su televisor a un canal vacío. Un pequeño tanto por ciento de la nieve que ven en la pantalla estará producido por este fondo de microondas. La única interpretación razonable del fondo es que se trata de la radiación residual de un estado temprano muy denso y caliente. A medida que el universo se expandiera, la radiación se habría enfriado hasta ser sólo el débil remanente que observamos hoy.

Aunque los teoremas de singularidad que demostramos Penrose y yo predecían que el universo tuvo un principio, no decían cómo había empezado. Las ecuaciones de la Relatividad General dejaban de ser válidas en la singularidad. Así, la teoría de Einstein no puede predecir cómo empieza el universo, sino sólo cómo evolucionará una vez que ha comenzado. Se pueden adoptar dos actitudes ante los resultados de Penrose y yo. Una es que Dios decidió cómo empezó el universo por razones que no podríamos entender. Ésta era la visión del Papa Juan Pablo II. En una conferencia sobre cosmología en el Vaticano, el Papa dijo a los delegados que era correcto estudiar el universo después de su comienzo, pero que no debían buscar el principio mismo, porque éste era el momento de la creación, y la obra de Dios. Me alegré de que no se hubiera dado cuenta de que yo había presentado en la conferencia un artículo donde sugería cómo empezó el universo. No me imaginaba siendo conducido ante la Inquisición, como Galileo.

La otra interpretación de nuestros resultados, preferida por la mayoría de los físicos, es que éstos indican que la Teoría de la Relatividad General deja de ser válida en los campos gravitatorios muy intensos en el universo primitivo. Debe reemplazarse por una teoría más completa. Esto era de esperar, en cualquier caso, porque la Relatividad General no tiene en cuenta la estructura a pequeña escala de la materia, que está gobernada por la teoría cuántica. Pero cuando el universo tiene el tamaño de Planck, una milésima de billonésima de trillonésima de centímetro, las dos escalas son iguales, y hay que tener en cuenta la teoría cuántica.

Para entender el origen del universo tenemos que combinar la Teoría de la Relatividad General con la teoría cuántica. Parece que la mejor forma de hacerlo es utilizar la idea de Feynman de una suma sobre historias. Richard Feynman era un personaje pintoresco, que tocaba los bongos en un club de *strip-tease* en Pasadena, a la vez que ejercía como físico brillante en el Instituto de Tecnología de California. Él propuso que un sistema iba de un estado A a otro estado B por todos los caminos o historias posibles. Cada camino o historia tiene una cierta amplitud o intensidad, y la probabilidad de que el sistema vaya de A a B se obtiene sumando las amplitudes para cada camino. Habrá una historia en la que la Luna esté hecha de queso azul, pero su amplitud será muy pequeña: malas noticias para los ratones.

La probabilidad para el estado del universo en el tiempo presente viene dada sumando las amplitudes para todas las historias que terminan en dicho estado. Pero ¿cómo empezaron las historias? Ésta es la cuestión del origen planteada de otra manera. ¿Requiere un Creador que decrete cómo empezó el universo? ¿O el estado inicial del universo está determinado por una ley de la ciencia? De hecho, esta pregunta surgiría incluso si las historias del universo se remontaran hasta el infinito pasado. Pero es más inmediata si el universo empezó hace sólo 15.000 millones de años.

El problema de lo que sucede en el principio del tiempo es algo parecido a la pregunta de qué sucedía en el borde del mundo, cuando la gente pensaba que el mundo era plano. ¿Es el mundo un plato llano con el mar derramándose por el borde? Yo lo he puesto a prueba experimentalmente. He dado la vuelta al mundo y no me he caído. Como todos sabemos, el problema de lo que sucede en ese borde quedó resuelto cuando la gente se dio cuenta de que el mundo no era un plato llano, sino una superficie curva. Sin embargo, el tiempo parecía ser diferente. Semejaba independiente del espacio, y similar a un juego de trenes eléctricos. Si hubo un principio, alguien tuvo que poner en marcha los trenes. La Teoría de la Relatividad General de Einstein unificó tiempo y espacio como espaciotiempo, pero el tiempo seguía siendo diferente del espacio; era como un pasillo, que o bien tenía un principio y un final, o bien continuaba para siempre. Sin embargo, Jim Hartle y yo nos dimos cuenta de que cuando se combina la Relatividad General con la Teoría Cuántica, ese tiempo puede comportarse como otra dirección en el espacio en condiciones extremas. Esto significa que se puede prescindir del problema de que el tiempo tenga un principio de una forma similar a como prescindimos del borde del mundo. Supongamos que el principio del universo fuera como el Polo Sur de la Tierra, y que la latitud geográfica desempeñara el papel del tiempo. El universo empezaría como un punto en el Polo Sur. Cuando uno se moviera hacia el norte, los círculos de latitud constante, que representan el tamaño del universo, se expandirían. Preguntar qué sucedió antes del comienzo del universo se convertiría en una pregunta sin sentido, porque no hay nada al sur del Polo Sur.

El tiempo, medido en grados de latitud, tendría un principio en el Polo Sur, pero el Polo Sur es un punto como cualquier otro, o al menos eso me han dicho. He estado en la Antártida, pero no en

el Polo Sur. Las mismas leyes de la naturaleza que valen en el Polo Sur son válidas en cualquier otro lugar. Esto acabaría con la objeción tradicional a que el universo tenga un principio: que sería un lugar donde las leyes normales dejarían de ser válidas. El comienzo del universo estaría gobernado por las leyes de la ciencia. La imagen que elaboramos Jim Hartle y yo de la creación cuántica espontánea del universo sería algo parecida a la formación de burbujas de vapor en agua hirviendo.

La idea es que las historias más probables del universo serían como las superficies de las burbujas. Aparecerían muchas pequeñas, que desaparecerían enseguida. Éstas corresponden a mini-universos que se expandirían pero colapsarían de nuevo cuando todavía tuvieran un tamaño microscópico. Son universos alternativos posibles, aunque no resultan de mucho interés puesto que no duran lo suficiente para desarrollar galaxias y estrellas, y mucho menos vida inteligente. Sin embargo, algunas de las pequeñas burbujas crecen hasta alcanzar un cierto tamaño en el que están a salvo de un re-colapso. Seguirán expandiéndose a un ritmo cada vez mayor, y formarán las burbujas que vemos. Éstas corresponderán a universos que empezarán expandiéndose a un ritmo cada vez mayor. Esto se llama inflación, igual que la subida de precios todos los años.

El récord mundial de inflación se alcanzó en Alemania tras la primera guerra mundial. Los precios se multiplicaron por un factor de diez millones en un período de dieciocho meses. Pero esto no era nada comparado con la inflación en el universo primitivo. El universo se expandió en un factor de un billón de billones en una minúscula fracción de segundo. A diferencia de la inflación en los precios, la inflación en el universo primitivo fue algo muy bueno. Dio lugar a un universo muy grande y uniforme, tal como el que observamos. Sin embargo, no sería completamente uniforme. En

la suma sobre historias, las historias que son ligeramente irregulares tendrán probabilidades casi tan altas como la historia completamente uniforme y regular. Por ello, la teoría predice que es probable que el universo primitivo sea ligeramente no uniforme. Estas irregularidades producirían pequeñas variaciones en la intensidad del fondo de microondas según las diferentes direcciones de procedencia. El fondo de microondas ha sido observado por el satélite WMAP, y se ha visto que tiene exactamente el tipo de variaciones predicho. Así que sabemos que estamos en la línea correcta.

Las irregularidades en el universo primitivo significarán que unas regiones tendrán una densidad ligeramente mayor que otras. La atracción gravitatoria de la densidad extra frenará la expansión de la región, y eventualmente puede hacer que la región colapse para formar galaxias y estrellas. Así que examinemos bien el mapa del cielo de microondas. Es el plano para la estructura global del universo. Nosotros somos el producto de fluctuaciones cuánticas en el universo muy primitivo. Realmente Dios juega a los dados.

Hemos hecho enormes avances en cosmología en los cien últimos años. La Teoría de la Relatividad General y el descubrimiento de la expansión del universo hicieron añicos la vieja imagen de un universo sin principio ni fin. En su lugar, la relatividad general predecía que el universo, y el propio tiempo, empezaría en el Big Bang. También predecía que el tiempo tendría un final en los agujeros negros. El descubrimiento del fondo cósmico de microondas y las observaciones de agujeros negros dan apoyo a estas conclusiones. Esto supone un profundo cambio en nuestra imagen del universo y de la propia realidad. Aunque la Teoría de la Relatividad General predecía que el universo debe haber surgido de un período de alta curvatura en el pasado, no podía predecir cómo emergería el universo del Big Bang. Así pues, la relatividad general por sí misma no puede responder a la pregunta central en cosmo-

logía: ¿por qué el universo es como es? Sin embargo, si se combina la relatividad general con la teoría cuántica quizá sea posible predecir cómo podría empezar el universo. Inicialmente se expandiría a un ritmo cada vez mayor.

La unión de las dos teorías predecía que durante este denominado período inflacionario se desarrollarían pequeñas fluctuaciones que llevarían a la formación de galaxias, estrellas y el resto de la estructura del universo. Esto está confirmado por observaciones de pequeñas no-uniformidades en el fondo cósmico de microondas, exactamente con las propiedades predichas. Así que parece que estamos en vías de entender el origen del universo, aunque se necesitará mucho más trabajo. Una nueva ventana al universo muy primitivo se abrirá cuando podamos detectar ondas gravitatorias midiendo con precisión las distancias entre naves espaciales. Las ondas gravitatorias se propagan libremente hasta nosotros desde los tiempos más remotos, sin ser perturbadas por ningún material interpuesto. Por el contrario, la luz sufre múltiples dispersiones por parte de electrones libres. La dispersión continúa hasta que los electrones quedan neutralizados, al cabo de 300.000 años.

Pese a haber tenido grandes éxitos, no todo está resuelto. Aún no tenemos una buena comprensión teórica de las observaciones que indican que la expansión del universo se está acelerando de nuevo, tras un largo período de frenado. Sin esa comprensión no podemos estar seguros del futuro del universo. ¿Continuará expandiéndose para siempre? ¿Es la inflación una ley de la Naturaleza? ¿O finalmente el universo colapsará de nuevo? Continuamente se producen nuevos resultados observacionales y avances teóricos. La cosmología es una disciplina muy activa y excitante. Nos estamos acercando a responder a preguntas ancestrales. ¿Por qué estamos aquí? ¿De dónde venimos?

