



Del Big Bang a los agujeros negros:

UN VIAJE POR EL UNIVERSO DE STEPHEN HAWKING

Por JOSÉ LUIS FERNÁNDEZ BARBÓN

Instituto de Física Teórica (IFT).

Universidad Autónoma de Madrid

Consejo Superior de Investigaciones Científicas



Stephen Hawking es uno de los héroes de la ciencia de mi generación. Pero yo creo que es un héroe global con el que se identifica prácticamente cualquier persona. Su discapacidad y, a pesar de todo, su enorme éxito y capacidad para alcanzar la cuotas más altas de creatividad y trabajo lo demuestran. Si tuviéramos que defender la raza humana en algún tipo de concurso intergaláctico, Stephen Hawking sería uno de nuestros campeones. Además, Stephen Hawking era consciente de ese papel que tenía, como un icono especial, y se convirtió de hecho en un icono popular.

La idea de este texto es que el lector tenga la posibilidad de calibrar cuál puede ser el legado y la importancia intelectual de Stephen Hawking en el campo de la física.

“Si el espacio se puede deformar, entonces la pregunta es si hay un límite de elasticidad, es decir, un límite de rotura”

Casi todos los científicos tienen una parcela o un objeto que les obsesiona y en el que desarrollan la parte importante de su trabajo. Aunque el trabajo de un científico de largo recorrido, como Stephen Hawking, toca muchos palos, siempre se puede identificar fácilmente algo así como su problema favorito y, en este caso, el objeto central de su carrera científica es lo que yo voy a llamar “los sumideros de espacio vacío retorcido”. Por supuesto, a lo que me estoy refiriendo es a los bien conocidos agujeros negros.

Los agujeros negros forman parte de la cultura popular a través de la ciencia ficción y, especialmente, los más jóvenes están muy acostumbrados a vivir rodeados de ellos y cosas todavía peores. En cierto modo, los agujeros negros cumplen, en la literatura de ciencia ficción y en el cine del siglo XX, el mismo papel que cumplían los abismos marinos en la literatura de navegación del siglo XIX. El Nautilus de Verne sucumbió al Maelstrom en Noruega, que era una especie de torbellino marino; y en las historias de ciencia ficción del siglo XX, las naves espaciales sucumben a los agujeros negros, es siempre el mismo tipo de historia. Así que tienen ese carácter de abismo final, en el sentido de que son definitivos y de que no se puede salir de ellos.

Sin embargo, los agujeros negros también forman parte de la cultura popular en las páginas de ciencia de los periódicos. Cada vez con más frecuencia vemos noticias acerca de descubrimientos y resultados que tienen que ver con su comprensión. De los agujeros negros, hoy en día sabemos que existen ahí fuera, es decir, que tenemos una gran confian-

za en que realmente existen aunque nunca hemos ido cerca de ninguno.

Cuando miramos por nuestros telescopios, la forma en que identificamos los agujeros negros es, en términos de estructura, cuando identificamos unos chorros de eyección que pueden medir tanto como la propia galaxia, 100.000 años luz. Ahora ya se pueden imaginar que el objeto o motor que es capaz de propulsar semejante emisión energética tiene que ser algo muy especial, tiene que ser un objeto muy extremo.

Los agujeros negros

Los agujeros negros son el único objeto conocido por la física convencional —la física comprobada— que es capaz de propulsar este tipo de fenómenos. La idea es que los agujeros negros son objetos con un campo gravitacional tan intenso que el material, cuando cae en él, se acelera tanto que casi llega a la velocidad de la luz. En cuanto una cosa va a la velocidad de la luz y colisiona con cualquier otra que ande por ahí, emite radiación en grandes cantidades. Es una fábrica de emisión de radiación simplemente porque se producen colisiones en caída sobre un campo gravitacional extraordinariamente intenso. Ahora, la cuestión es saber cómo de intenso puede ser un campo gravitacional y cuáles son los límites de esta intensidad.

Esta cuestión es mucho más vieja que Stephen Hawking; de hecho, los agujeros negros son muy anteriores a Stephen Hawking. Es una cuestión tan vieja que se la plantearon ya en la época de la Ilustración. Un par de ilus-



trados que trabajaron a finales del siglo XVIII, John Michell, en Inglaterra, y Pierre-Simon Laplace, en Francia, ya se plantearon la cuestión de si podía haber objetos con un campo gravitacional tan intenso que la luz cayera como si fuera una piedra. De ahí viene, de hecho, la idea de agujero negro; ni siquiera la luz puede salir porque queda atrapada.

Es una idea un tanto sorprendente o chocante, o al menos así debería parecerles, porque el hecho de que la luz caiga no deja de ser bastante extravagante. Si yo enfoco un láser al techo, no tiene pinta de caer para nada; sin embargo, si yo suelto una piedra, cae cinco metros en un segundo. Entonces, ¿de qué estamos hablando? La razón por la que la luz no se ve apreciablemente que caiga es porque es muy rápida. Mientras la piedra recorre cinco metros en caída en un segundo, la luz está casi llegando a la luna. Para poder determinar si la luz cae como una piedra o no, es necesario hacer un experimento en el que realmen-

te comparamos la caída de los dos al mismo tiempo. Por ejemplo, si yo enfoco un láser hacia la pared, las partículas de luz tardan aproximadamente un nanosegundo en llegar ahí. Imaginen que lo enfoco de forma horizontal y, a la vez que le doy al láser, suelto una piedra a la misma altura. En un nanosegundo la piedra cae muy poquito, así que la cuestión es: ¿cae más la piedra o la luz? Cada vez que se ha hecho un experimento equivalente a este, el resultado es que la luz cae exactamente igual que una piedra.

El hecho de que la luz caiga ya es plausible si uno tiene en cuenta la teoría de Einstein. Cuando Einstein nos dijo que la energía y la masa son lo mismo, es decir, que la masa es energía concentrada, eso también quiere decir que a cualquier cosa que tiene energía le puedes asignar una masa efectiva, por lo que es natural que caiga. La luz tiene energía, así que es natural que caiga; pero lo sorprendente es que cae exactamente igual que una pie-

dra. Este es uno de los principios básicos de la física y es uno de los principios en los que Einstein basó su formulación de la naturaleza del espacio y el tiempo. Lo que voy hacer ahora es asumir, igual que Einstein, que la luz cae como una piedra para tratar de deducir y explicar qué es un agujero negro.

Si la luz cae, quiere decir que si yo tengo tres satélites como los de GPS y quiero dibujar un triángulo entre ellos con rayos láser, por ejemplo, cuando apunto con el láser tengo que apuntar un poco alto —diríamos— porque la luz cae un poco. Es como cuando voy apuntar a una diana, como no ajuste un poco alto, se me queda baja. Eso quiere decir que cuando complete el triángulo, los ángulos del triángulo van a estar un poco más abiertos de lo habitual. Por otra parte, la luz tiene la propiedad de que siempre escoge el camino más corto; es otra propiedad física de la luz. O sea, que este triángulo abierto —este triángulo curvo— está hecho con líneas de longitud mínima, es decir, es realmente un triángulo a pesar de que parece abierto. Es un triángulo en el sentido de que el recorrido de la luz es el camino más corto entre estos dos puntos, a pesar de que está curvado.

Si esto lo hacemos de verdad para la Tierra, el resultado es que a la suma de los ángulos interiores del triángulo —180 grados de acuerdo con lo que nos enseñaron en la geometría griega— habría que sumarle una parte en 1.000 millones. Es muy poquita la diferencia, sin embargo, esa diferencia es crucial para que funcione el GPS de los móviles, porque si no se perdería la calibración rápidamente. En cuestión de horas, en vez de tener una precisión de metros, tendría una precisión de kilómetros. El GPS utiliza este hecho, esto no es ciencia ficción. Es algo perfectamente incorporado incluso en la industria, es decir, que es algo que entendemos muy bien.

Para ver que estos triángulos torcidos son triángulos, y para que parezca plausible, pondré un ejemplo muy sencillo. Si imaginamos que cogemos una pelota y un lápiz y dibujamos un triángulo sobre la superficie de la pelota, empezáramos en el polo norte y trazaríamos una línea de longitud mínima hacia el ecuador. En una esfera, las líneas de longitud mínima son los meridianos. Un señor que está constreñido a vivir sobre la esfera no se puede ni imaginar que existe un interior de la esfera o que hay cosas fuera de la esfera. Su universo es la esfera y para este señor esto es una recta, es una línea de longitud mínima. Si ahora gira 90 grados y va por el ecuador, el ecuador también es una línea de longitud mínima. Si le decimos que recorra un cuadrante y gira a la izquierda otra vez 90 grados, acaba otra vez en el polo norte y cerramos un triángulo. Como lo único que hemos hecho es movernos en el cuadrante todo el rato, y esto se puede hacer con un lápiz en una pelota, resulta que el ángulo de llegada es también 90 grados. Ahora, si sumo los ángulos sale 270 grados —que es mucho más que 180—, o sea, que el teorema de los griegos no se satisface aquí tampoco. Esta situación es lo que los matemáticos llaman un espacio con curvatura, y el nombre es obvio dado que el modelo es la esfera que está curvada.

Gauss y Riemann, que desde el siglo XIX determinaron todas las maneras posibles en las que un espacio geométrico se puede curvar, determinaron las matemáticas generales de la curvatura. Además, se dieron cuenta de que la curvatura era una propiedad física, es decir, no estaba garantizado que nuestro universo —el espacio en el que vivimos— satisfaga las leyes de la geometría de los griegos. Cuando mides triángulos de andar por casa, te sale que la suma de los ángulos son 180 grados, pero ya hemos visto que si el triángulo es del tamaño de la tierra, hay una diferencia de una parte en mil millones. Era imposible que

Gauss se diera cuenta de eso, pero ya los matemáticos y físicos del siglo XIX empezaron a imaginar la posibilidad de que si tomaras triángulos gigantes, tal vez la diferencia sería apreciable. Lo que Einstein hizo, realmente, fue darnos una fórmula para calcular cuánto se desvía el triángulo de 180 grados, dependiendo de dónde lo dibujes, cómo lo dibujes, cómo sea de grande, etcétera.

La idea es que la geometría de los griegos se ve afectada cuando tienes una masa que produce un campo gravitacional —una concentración de energía. Cuando tienes un objeto que concentra energía, los triángulos se abren y la geometría se curva; el espacio es directamente como si fuera elástico. Esta es la idea fundamental de Einstein en el año 1915 y es, probablemente, una de las dos o tres ideas básicas de la física, de las más profundas, de las que están en la base del edificio y son nucleares. Así que el eslogan es que el espacio se comporta como un medio elástico.

Las ondas gravitacionales

Cualquiera que haya estado en este planeta, se habrá dado cuenta de que se han descubierto las ondas gravitacionales, que no son más que lo que voy a explicar a continuación. Un objeto curva el espacio a su alrededor, lo deforma. Si hay otro objeto en otro punto, lo deforma también. Ahora, si hay una situación en la que la posición de estos objetos depende del tiempo —por ejemplo, porque están girando uno alrededor del otro— entonces, la deformación depende del tiempo, va cambiando. Pero el espacio es un medio elástico, entonces si tenemos un medio elástico y una deformación que depende del tiempo, lo que



pasa es que se forman ondas. Estas ondas son ondas de curvatura. Esto quiere decir que si pasara una onda gravitacional gorda, la forma que tendríamos de detectarla sería dibujar un triángulo e intentar comprobar el teorema de Pitágoras: no saldría. La suma de los cuadrados de los catetos no sería igual a la hipotenusa al cuadrado; a lo mejor sería igual salvo un 10%. Cuando la onda pasa, el espacio se vuelve a quedar tieso y entonces el teorema de Pitágoras vuelve a funcionar. Esa es la idea de las ondas gravitacionales.

El descubrimiento de las ondas gravitacionales se llevó el premio Nobel de este año. El experimento LIGO —a través del cual se realizó este descubrimiento— es algo increíble, una especie de monumento a la ingenui-

“Hawking te da una opción de definir cuánta información oculta hay en el agujero negro, porque te proporciona una manera de extraerla: esperar a que se evapore el agujero negro y, entonces, tienes todas estas partículas que puedes estudiar”

dad humana. Las ondas gravitacionales son muy difíciles de detectar, mucho más difíciles que las ondas electromagnéticas, por una razón muy simple: la gravedad es una fuerza muy débil. Hemos dicho que la curvatura del espacio está relacionada con la fuerza de la gravedad, por tanto, si la gravedad es una fuerza muy débil, eso quiere decir que la curvatura es pequeña. Es decir, el espacio aunque es elástico, es bastante rígido en el sentido de que cuesta mucho doblarlo. Hace falta mucha energía para que la deformación del espacio sea significativa, pero la fuerza de gravedad es enormemente pequeña. Para ver lo pequeña que es solo hay que notar que sosteniendo un lápiz con dos dedos ya le estoy ganando al planeta entero, que está empujando el lápiz para abajo. Eso quiere decir que para conseguir deformaciones del espacio significativas, necesitas fenómenos súper violentos, acumulaciones de energía extremas, mucho más grandes de las que tienes en un planeta o en una estrella normal. Y algo realmente extremo, por definición, tiene que ser poco común. Es decir, lo normal es que las fuentes de ondas gravitacionales te queden muy lejos, porque las cosas extremas no se dan todos los días. Pero como son ondas, si se producen lejos, para cuando lleguen aquí están muy atenuadas porque se van diluyendo. Así que cuando llegan son pequeñísimas y muy difíciles de detectar; primero, porque para generarlas hace falta cosas muy raras; y segundo, porque esas cosas raras van a estar muy lejos. Por eso se tardaron 100 años en poderlas detectar.

Si el espacio se puede deformar, entonces la pregunta es si hay un límite de elasticidad, es decir, un límite de rotura. ¿El espacio puede aguantar cualquier carga o, por el contrario, se puede romper? Habíamos dicho que si tenemos una cierta energía concentrada, eso curva el espacio de tal forma que los triángulos se abren un poquito. Si metéis más energía en la misma zona, los triángulos se abren más y más. Pero hay un límite a la apertura de los triángulos y ese límite es cuando los triángulos desaparecen. Si metemos más energía, llega un momento en que el triángulo se convierte en un círculo —todos los ángulos miden 180 grados— y ya no se puede abrir más, pero yo sigo pudiendo meter cosas ahí. Si meto un gramo más de material, tiene que pasar algo nuevo.

La teoría de Einstein dice que lo que pasa es que el espacio colapsa. Es decir, toda esta región colapsa sobre sí misma como si se derrumbara el propio espacio y arrastra consigo la luz y todo el material que hay ahí. El colapso es más rápido que la velocidad de la luz, con lo cual no es posible salir. Se forma lo que se llama un agujero negro, con una singularidad en el centro en la que no sabemos lo que pasa. Ahí ya la teoría de Einstein no nos dice lo que pasa, porque las ecuaciones dan resultados absurdos, o sea, que deja de funcionar. La situación es análoga a la de un sumidero o una cascada. Si estás nadando cerca de una cascada, puedes estar nadando tranquilamente contra corriente, pero como hemos visto muchas veces en las pelis, cuando hay

alguien que está a punto de caer en una de estas grandes cascadas, no se dan cuenta. Entonces a alguien se le ocurre decir: "sal de ahí, porque como te acerques demasiado, no te vas a dar cuenta y ya va a ser tarde". Cuando la velocidad de arrastre de agua es superior a la velocidad que tú puedes desarrollar remando, entonces, por más que remes, no vas a lograr contrarrestar la corriente y estás condenado a caer. Es decir, que si yo me dejo llevar hasta una zona demasiado próxima al sumidero, no podré salir y es posible que me pase antes de que me dé cuenta. Pero no hay una bandera que te diga: "eh, ya no puedes salir"; no, en tu entorno todo es normal, solo que ya es tarde. Esa región, ese límite de no salida, se llama horizonte de sucesos. Es el borde del agujero negro y el interior del agujero negro es la zona de la que igual no puedes salir.

Esta era una descripción metafórica. Una descripción más precisa es la que te da la solución matemática de las ecuaciones que escribió Einstein para describir cómo funciona la elasticidad del espacio. Lo que dice es que la curvatura dentro del agujero negro —esta deformación del espacio— no tiene límite. Lo que pasa es que en la zona de fuera el espacio está curvado —igual que está curvado alrededor de la Tierra— por ejemplo. La curvatura es cada vez mayor según te vas acercando al borde; pero esa curvatura es estática, es decir, es una curvatura que no cambia con el tiempo. Sin embargo, una vez que cruzas al interior, el espacio tiene una curvatura variable e inestable, es decir, está derrumbándose y no está parado. Es como un túnel, se está alargando en una dirección y se está contrayendo en otras dos. La sensación cuando tú entras en



un agujero negro, en vez de ver el interior de una esfera, lo que ves es que el espacio se está alargando como si fuera un túnel, de forma que la entrada que queda detrás se está alejando y las paredes se te están viniendo encima, está colapsando. Hay una dirección que crece y otras dos que se achican. Y no puedes salir porque aunque te des la vuelta y salgas corriendo, se te cae encima antes de que lo consigas. De hecho, todo el túnel colapsa —se derrumba sobre sí mismo— al mismo tiempo y eso se llama singularidad. La singularidad no es un punto en el espacio, sino que es un momento en el tiempo, es cuando el túnel entero se derrumba. Es decir, el espacio implodiona y se hace de volumen cero; ahí ya no sabemos lo que pasa.

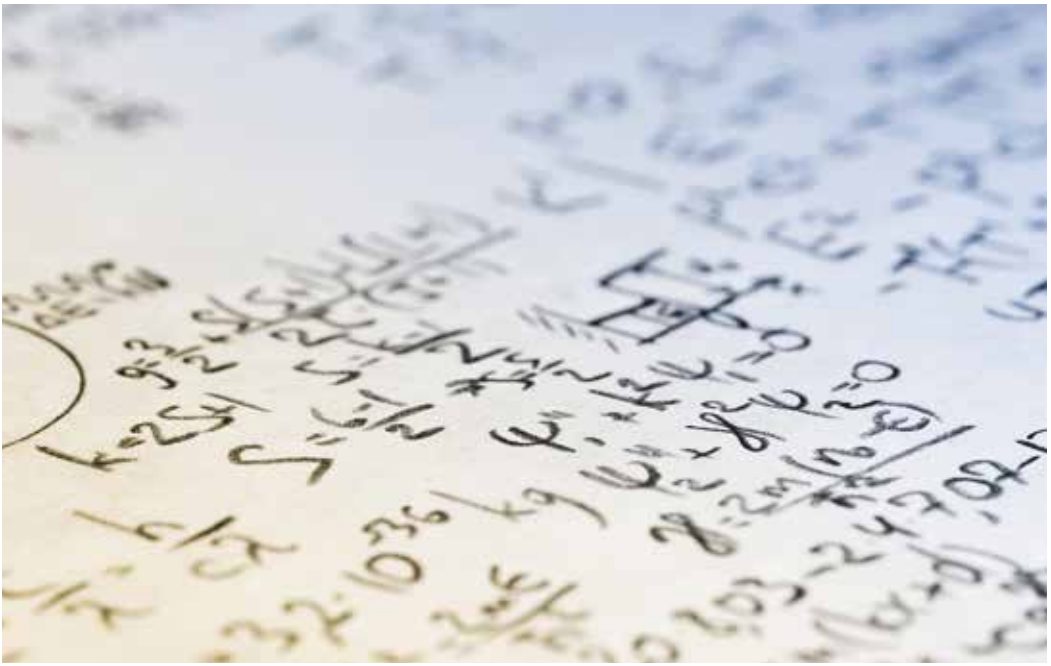
El primer gran resultado de Hawking —cuando era joven—, fue la demostración matemática de que este fenómeno de la singularidad —el derrumbamiento del túnel— es un fenómeno genérico, es decir, es un fenómeno que no es el resultado de una situación muy especial. Es la constatación de que la teoría de Einstein tiene dentro la semilla de su propia destrucción —en cierto modo—, porque en la teoría de Einstein, aunque al principio puedes formar un agujero negro colapsando un motón de vacas con sus escafandras, por ejemplo, llega un momento en el que aparece esto y las ecuaciones dejan de tener sentido. O sea, que la teoría de Einstein siempre puede seguir describiendo el espacio hasta que en un momento dado la teoría y las ecuaciones dejan de valer.

Esto lo hizo con Roger Penrose, de hecho, el verdadero impulsor de este tipo de pruebas y demostraciones. Es un matemático un poco mayor que Hawking y fue su mentor en cierto modo. Hawking se basó en el formalismo de Penrose para hacer estas demostraciones y, de hecho, trabajaron juntos y desarrollaron juntos muchos de estos teoremas. Básicamente, la idea es que esta idea de las singularidades es algo robusto, es decir, las singularidades son inevitables. Es una forma muy nítida de representar las limitaciones de nuestra descripción del mundo. Nuestras teorías más fundamentales, como por ejemplo la teoría de Einstein del espacio y el tiempo, dejan de funcionar en un minuto si entras dentro del agujero negro. En el centro de nuestra galaxia hay un agujero negro que tiene el tamaño de 20 veces la órbita de la luna, tiene cuatro millones de masas solares y pesa como cuatro millones de soles; o sea, que es un bicho bien gordo. Si te metes ahí con tu nave espacial tienes que tener cuidado porque como es grande, igual te caes dentro. Si caes dentro, en un minuto no hay ningún libro de física en el mundo que te diga lo que

pasa. No a ti, porque tú ya habrás desaparecido, a las partículas elementales que te componen. O sea, que la barrera de conocimiento que representa la singularidad es muy nítida y muy radical, y es una forma muy clara de decir que nuestro conocimiento de la física es todavía muy limitado.

Estos resultados no incluyen el efecto de la teoría cuántica. Como sabemos, la física está basada en dos pilares fundamentales que son la teoría de la relatividad y la teoría cuántica. El concepto básico de la teoría de la relatividad es el concepto de espacio-tiempo, una especie de mezcla entre el espacio y el tiempo que se inventó Einstein en 1905. Y el concepto básico de la teoría cuántica es el concepto de partícula cuántica; es una noción de partícula un poco peculiar, porque tiene una especie de baile de San Vito, está todo el rato fluctuando. Las llamamos partículas por llamarlas de alguna manera, porque en realidad no sabemos muy bien lo que son. Las describimos con mucha precisión matemáticamente, pero tal vez la mejor manera de referirse a ellas es decir que son como átomos de información. Son como los componentes fundamentales, los bits fundamentales de información de la construcción de la materia. Sabemos que interactúan como partículas —porque cuando tropiezan unas con otras, lo hacen como si fueran partículas—, pero cuando van a su bola de un lado para otro sin interactuar, se parecen más a las ondas. Por eso hay toda esta historia de que si son partículas o si son ondas; en realidad, no son ni partículas ni ondas. Les llamamos partículas cuánticas, aunque tal vez deberíamos haberles inventado un nombre un poco más peculiar.

Toda esta historia de Hawking y Penrose no tiene en cuenta para nada la teoría cuántica, pero sabemos que si la teoría de Einstein falla, tal vez es porque no tenemos en cuenta la teoría cuántica.



Medio siglo más tarde, seguimos ignorando qué pasa en este caso. Aunque hemos trabajado mucho en cómo incorporar la teoría cuántica al espacio-tiempo, este problema particular de la singularidad es el más duro que hay –digamos que todavía no sabemos cómo meterle el diente. Pero Hawking dio los primeros pasos en esta ruta a mediados de los años 70, algunos pasitos que parecían modestos, pero que están resultando ser bastante importantes. Un pasito significa que en vez de preocuparse de la singularidad –que es el problema más difícil–, se preocupó simplemente de entender lo que pasaba en el borde del agujero negro. Si se da un pasito pequeñito, ahí el borde del agujero negro es un trozo de vacío y lo único que se nota es que está empezando a crecer el tubo un poquito. Si el agujero negro es grande, la singularidad tarda mucho en llegar y durante un rato todo parece muy normal, solo que el espacio se deforma un poquito con el tiempo, pero es suave. Este es el sitio que Hawking estudió. Si se quiere decir algo sobre la teoría cuántica y el borde del agujero negro, tienes que preguntarte qué dice la teoría cuántica

sobre el vacío, y la respuesta es que la teoría cuántica dice muchísimo sobre el vacío. En realidad, la teoría cuántica casi todo lo que dice, lo dice sobre el vacío. Los físicos del siglo XX estamos obsesionados con el vacío porque hemos descubierto que no está vacío en absoluto, sobre todo después de haber descubierto la teoría cuántica.

La historia de la teoría cuántica está relacionada, por supuesto, con la larga historia de investigación de la estructura de la materia, y la profundización en los componentes básicos de la materia –de los objetos que vemos. Lo que hemos descubierto en los últimos 100 años es que existe una estructura jerárquica que empieza en una serie de piezas de Lego básicas –estos átomos de información que comentaba–, lo que llamamos las partículas elementales. Forman una lista que no es muy grande, y todo lo que hay y podemos identificar en el mundo físico se puede construir a base de combinar estas piezas de Lego básicas: núcleos, átomos, moléculas, diferentes sistemas complejos de moléculas que forman la materia condensada, los sólidos, etc.

Los aceleradores de partículas

Todo esto parece cartografía y parece simple, pero no lo es tanto. Resulta que para poder descubrir estas partículas no basta con una lupa, hacen falta unos microscopios especiales que miden decenas de kilómetros —los aceleradores de partículas—, como por ejemplo el LHC que está en el CERN, en Ginebra. Esto es un poco como Lego, una especie de monumento a la capacidad humana de construir cosas imposibles para el simple hecho de investigar cuál es la estructura del mundo a nivel fundamental. Es una especie de catedral del conocimiento, un objeto tremendamente difícil de hacer y tremendamente difícil de operar. Es un microscopio que lo que hace es básicamente estudiar estas partículas. Hay una partícula especial que es el Higgs —que es la última que se ha descubierto. La partícula de Higgs es como el anillo único de Sauron, controla a todas las demás. Es la más importante de todas —en cierto modo— y por razones que no entendemos del todo. Además tiene un halo de misterio especial que la hace muy interesante. Pero una cosa que sabemos desde hace mucho es que la mayor parte de estas partículas son inestables, es decir, en realidad solo existen en el vacío un ratito y desaparecen. Si miras el vacío con estos aceleradores, lo que ves es que está lleno de una especie de medio hirviendo en el que hay constantemente partículas y anti-partículas siendo generadas y aniquiladas. Es decir, las partículas junto con sus anti-partículas se generan y se aniquilan, y están haciendo una especie de baile coreografiado en el vacío. Se parece a un pote de agua hirviendo, pero no es lo mismo porque hay una coreografía muy estricta. Esa coreografía está relacionada con algo muy misterioso que se llama entrelazamiento cuántico. Cuando las partículas nuclean en un punto, eso afecta a cómo nuclean las partículas en otro. Es decir, es un baile muy especial en el que está todo muy correlacionado, pero es un baile de partículas y anti-partículas. Si



lo amplias, lo que verías es que las fluctuaciones de energía en el vacío se pueden analizar en términos de estos pares de partículas y anti-partículas.

Esto sigue de la teoría de la relatividad y de la mecánica cuántica. De hecho, es una de las cosas que mejor entendemos de toda la física, porque esta historia del baile cuántico en el vacío tiene consecuencias experimentales que podemos verificar en los laboratorios de física de partículas. En algunos casos, esas consecuencias experimentales están comprobadas con diez cifras decimales, es decir, no estoy hablando de nada especulativo, esto es algo que se entiende muy bien. Si miramos al vacío a cortas distancias, vemos pares de partículas y anti-partículas, son iguales, solo que una es de derechas y otra de izquierdas. Todos sus números están invertidos, si una tiene carga positiva, la otra tiene carga negativa —para todo tipo de cargas que tengan—, y desaparecen. Se crean y se aniquilan a partir del vacío. Tienen alguna estructura y hay algunas partes de esta estructura que son relativamente fáciles de identificar. Por ejemplo,



cuando las fluctuaciones de energía son muy grandes, cuando hay un pico de energía en una zona pequeña, las partículas anti-partículas que responden a esa fluctuación se crean y se destruyen en una zona muy pequeña, de distancias muy cortas y en un tiempo muy rápido. Por el contrario, las fluctuaciones de baja energía, en las que el pico de energía es mucho más pequeño, corresponden a partículas que nucleon en una región más grande, y tardan más tiempo hasta que se vuelven a encontrar y se vuelven a aniquilar.

La gente piensa que cuando los físicos decimos que los aceleradores de partículas son microscopios, piensan que estamos ahí a ver si vemos la partícula pasar, pero en realidad no funcionan así. Los aceleradores de partículas son microscopios que están mirando el vacío. Tienes estos pares de partículas y lo que haces es inyectar energía en una zona determinada para romper el baile antes de que se aniquilen. Le metes energía entre medias para separarlas y entonces no se aniquilan, salen para afuera. Así, estudiando sus propiedades, puedes deducir las propiedades del

vacío, es decir, cuál es la probabilidad de que esa partícula se esté nucleando, qué energía tenía, qué probabilidad hay de que antes de que esa partícula se nuclee, nucleee otra más y tarde un rato más, etcétera. Hay toda una serie de procesos muy complicados que puedes estudiar de esta manera, pero para poder estudiarlo tienes que extraer las partículas de vacío, y para extraerlas tienes que meter energía para romper el baile. Literalmente, lo que haces es generar la partícula anti-partícula y luego separarlas inyectando energía; así es como funciona el acelerador de partículas. La energía que tú metes, la metes con otras partículas que utilizas para hacerlas colisionar en una zona muy pequeña donde inyectas la energía. O sea, que las partículas que tú utilizas en el acelerador es para inyectar energía y abrir los pares del vacío.

Lo que Hawking descubrió a mediados de los 70 es que el estiramiento del espacio que hay en la garganta del agujero negro funciona igual que un acelerador en este sentido. Es decir, el espacio se estira un poquito y entonces es capaz de separar los pares antes de que se vuelvan a juntar. Interfiere en el baile cuántico del vacío, lo desestabiliza y empieza a generar partículas que no se aniquilan, o sea, partículas desaparejadas. Esas partículas desaparejadas son la radiación de Hawking.

El horizonte del agujero negro es la parte de fuera, el espacio estático, que está curvado pero está parado. La parte de dentro es el espacio dinámico, es la zona donde el tubo se está alargando, el espacio se está estirando. Hay un efecto como de deriva —es como si fuera una corriente de espacio—, de tal forma que si consideras fluctuaciones que corresponden a partículas que se nucleon a ambos lados del horizonte, el efecto es que el arrastre hace que la partícula que queda dentro se separe y entonces no se vuelva a aniquilar. Cuando haces la cuenta —esto requiere ya

hacer el cálculo— ves que la partícula que queda fuera, si tiene una cierta energía, la otra tiene energía negativa. Lo que ha pasado es que el agujero negro se ha tragado una partícula de energía negativa, a costa de sacar aquí fuera una partícula de energía positiva. No es que las partículas crucen el horizonte, es que tú generas pares, energía positiva y negativa, el negativo se lo come y el otro queda fuera. Es decir, que el agujero negro pierde energía a base de comer energía negativa. Como el tamaño del agujero negro es proporcional a su energía —a su masa—, lo que ocurre es que después de tragar una partícula de energía negativa, se hace un poquito más pequeño; el horizonte cede un poquito y el cuello del tubo se hace un poquito más pequeño. Esto es muy lento, ocurre pasito a pasito, partícula a partícula. Lo que ocurre es que el agujero negro se va evaporando, emitiendo partículas por este proceso, y como es tan lento se llama evaporación; si fuera rápido, lo llamaríamos desintegración. Cada emisión tiene una energía pequeñísima, o sea que al final te queda una nube de partículas, pero el tiempo que tiene que pasar es gigantesco. Por ejemplo, los agujeros negros, como los que vieron los de LIGO, tienen una masa de unas 30 masas solares, y un tamaño que a lo mejor es del orden de 100 kilómetros. Estos agujeros negros tardan en evaporarse unos 10^{80} o 10^{90} años. La edad del universo es 10^{10} años, unos 10.000 millones de años. Entonces, tienes que decir que tardan a lo mejor 10^{70} veces más que la edad del universo en evaporarse. No es 70 veces más, es 10^{70} , un 1 con 70 ceros veces más que la edad del universo; o sea, que en la práctica son eternos. Cabe pensar que antes de que los agujeros negros que hay fuera se evaporen, cosas muchos más terribles le pueden pasar al universo. Es improbable que el universo dure tanto. Entonces, ¿esto es irrelevante? ¿Por qué Hawking se hace tan famoso por describir un proceso que es tan minúsculo?

Para que este proceso fuera importante a nivel cuantitativo, haría falta que los agujeros negros fueran muy pequeños. Es posible que existan estos agujeros negros pequeños, pero no hay una evidencia terriblemente fuerte a su favor. Los agujeros negros de los que tenemos buena evidencia son todos grandes, y entonces este efecto es completamente irrelevante. De hecho, los agujeros negros están ahí fuera ahora, no están perdiendo masa, están todos comiendo material, e incluso aunque los colocaras en el vacío seguirían comiendo radiación de fondo de microondas, que está a 3° kelvin y está por todas partes; la temperatura de estos agujeros negros es de microkelvin, millonésimas de grados kelvin. Están mucho más fríos que el vacío intergaláctico, con lo cual siguen tragando todo el rato, y aunque los colocaras lejos de cualquier tipo de gas que pudiera caerles o los tuvieras a dieta, la radiación de fondo de microondas sería suficiente para mantener a los agujeros negros creciendo. Entonces, ¿esto es irrelevante? ¿Por qué hacemos tanto ruido acerca del hecho de que los agujeros negros se pueden evaporar?

No es irrelevante por razones conceptuales. Lo importante aquí es que el agujero negro es un bicho que está hecho de vacío, es espacio retorcido. Pero Hawking ha descrito una manera de transformarlo en partículas elementales, de descomponerlo en piezas básicas de información, en las piezas básicas del Lego de lo que está hecho todo en el mundo. Es decir, que estudiando este proceso uno podría detectar la estructura fina de la que está hecho el espacio-tiempo a nivel cuántico. Si yo tengo un trozo de carbón y lo volatilizo, toda la información acerca de la estructura de las partículas que formaban el trozo de carbón, en principio —aunque es muy difícil en la práctica— está contenida en el estado detallado de todos los fotones que están por ahí desperdigados, como resultado de haber

volatilizado el trozo de carbón. En la práctica es imposible hacerlo, pero es muy importante para los principios de la física que la información no se puede destruir. Eso es un principio básico de la física y, en particular, es como el principio más fundamental de la física cuántica: la información no se puede destruir.

Hawking te da una opción de definir cuánta información oculta hay en el propio espacio curvado –en el agujero negro–, porque te proporciona una manera de extraerla: esperar a que se evapore el agujero negro y, entonces, tienes todas estas partículas que puedes estudiar. Por ejemplo, una cosa muy fácil que puedes hacer es contarlas, y cuando las cuentas ya hay una sorpresa, inmediatamente. Entonces las cuentas, una, dos, tres, hasta 10^{70} . Vamos a llamar “S” al número de partículas que salen de la desintegración Hawking de un agujero negro. Por supuesto, nadie las ha contado nunca pero Hawking te da la fórmula para calcularlas. Lo que da es que este número de partículas es proporcional al área del horizonte con un coeficiente, y aquí aparece la velocidad de la luz, la constante de Newton y la constante de Planck de la mecánica cuántica. El número de componentes de partes móviles de unidades de información que tiene un sistema físico, está relacionado básicamente con lo que los físicos llaman la entropía. La entropía es el número de componentes caóticos móviles que tiene un sistema y que dan información oculta sobre el sistema. En el caso del agujero negro, es obvio que la información estaba oculta porque no ves nada de lo que hay dentro. Así que, contando el número de partículas que salen, tienes una estimación del número de componentes del Lego que hacen el agujero negro al nivel cuántico, y el resultado es sorprendente porque es proporcional al área del horizonte. Es el único sistema físico que conocemos en el que su entropía o su número de componentes fundamentales, de alguna manera, se organi-

zan en el área y no en el volumen. En el trozo de carbón, si yo cuento el número de fotones que obtengo después de volatilizarlo, va a ser proporcional –con una constante de proporcionalidad, que es un número calculable– al número de partículas elementales —neutrones, protones, electrones– que tenía en el trozo de carbón. Pero lo que está claro es que ese número va a ser proporcional al volumen del carbón, porque las partículas elementales se organizan en el volumen, en el espacio. Sin embargo, aquí el resultado es que el número de componentes cuánticos del agujero negro es proporcional al área del borde del agujero negro, como si estuviera vacío por dentro. Es como si toda la información que contiene el agujero negro estuviera sobre el horizonte.

Esta es una idea que le debemos a Jacob Bekenstein, un físico genial israelí de origen mexicano que por desgracia falleció hace dos años. Trabajó toda la vida en Israel y tuvo esta idea, un poco loca, de que la información del agujero negro podría estar contenida como unos píxeles en el horizonte. Propuso este tipo de fórmula y lo que hizo Hawking fue tratar de demostrar que era incorrecto, que esto era un locura. Decía que era un absurdo porque no puede haber cosas plantadas en el horizonte, porque cualquier cosa que está sobre el horizonte parada tiene que ir a la velocidad de la luz. No puede sostenerse nada ahí, el horizonte se lo traga todo para dentro; entras en el tubo, llegas a la singularidad y ya está, en el horizonte no hay más que vacío. ¿Cómo vas a tener la información o las partículas ahí colocadas? Sin embargo, se puso a calcular para demostrar que esta fórmula no tenía sentido y no solo encontró que sí que tenía sentido, sino que la demostró. Es decir, encontró una demostración de esta fórmula; no es una estimación, sino que es un cálculo. La contribución de Hawking fue poner un 4, pero ese 4 tiene un sentido muy fuerte porque quiere decir que es el resultado de un cálculo, es decir, el resul-

tado de una demostración rigurosa. Así, esta idea de que la información de todos los posibles estados microscópicos del agujero negro está sobre el horizonte parece ser correcta. ¿Pero cómo puede ser que sobre el horizonte haya estructura o píxeles de algún tipo?

Esta es la base de la idea de mayor recorrido sobre el intento de unificar la gravedad de Einstein con la teoría cuántica en los últimos 30 años. Es decir, que si querías saber por qué Hawking se considera importante es, básicamente, porque en los últimos 30 años la idea favorita de todo el mundo para seguir avanzando en este problema se basa en empezar aquí, empezar en la fórmula de Bekenstein-Hawking. La idea es que el interior del agujero negro es como un holograma, esta es la idea loca, digamos que revolucionaria. En un holograma, tenemos una figura tridimensional, que en realidad es una imagen. Físicamente lo que tenemos es una película que tiene unos píxeles. La información para extraer la figura tridimensional está codificada, pero está codificada en una película, y la película es en dos dimensiones; es una cosa plana con unos píxeles. Luego iluminamos con unos láseres y unos espejos y obtenemos la figura tridimensional, pero físicamente la información está en un píxel en dos dimensiones. Esto es una idea parecida, la idea es que la información está en el horizonte, pero el espacio interior es el tubo que está creciendo y es una especie de decodificación de la información del horizonte. La idea, digamos más avanzada, es que todo el espacio tridimensional podría ser una imagen de unos píxeles que están en el borde del espacio-tiempo, en el borde exterior del universo. Es una idea completamente loca, y podéis pensar que esto no tiene ningún recorrido, pero esto ilustra el modus operandi de la física teórica.

En la física teórica, en una situación ideal, la idea puede ser verificada experimentalmente,

y así fue durante muchas décadas hasta mediados del siglo XX. Luego, los teóricos avanzaban o profundizaban tanto que los experimentos eran cada vez más difíciles, cada vez más caros y tardabas una década. Ahora, hay cosas que se pueden comprobar experimentalmente, pero tal vez hace falta construir un nuevo acelerador de partículas y tardas tres décadas. En el caso de las ideas de Hawking, la escala temporal puede ser de siglos para poder verificar experimentalmente estas ideas. Entonces, ¿cómo funciona realmente? La gente piensa que con un experimento con un acelerador de partículas que tarda tres décadas en formarse, en el día que lo conectan, ese día van a morir 1.000 teorías y que solo va a quedar una. Parece que los teóricos, que han estado inventando teorías todo el rato ahí, llegan por la mañana, se inventan una nueva partícula, una nueva fuerza, la publican, la ponen en el archivador, y luego cuando conectan el experimento, van ahí a mirar todo lo que han escrito para ver si han acertado en alguna; como si fuera una lotería. Pero no, no funciona así el negocio. En realidad el negocio funciona de manera que tú, cuando tienes una idea, primero la estudias tú mismo y, normalmente, mueren todas esa mañana. De vez en cuando, una vez al mes, no eres capaz de cargártela en una mañana y vas al colegio del despacho de al lado, se la cuentas, y normalmente te la mata inmediatamente. Si después de este proceso sobrevive, entonces publicas un artículo —y aquí estoy asumiendo que es una nueva idea, porque muchas veces publicamos artículos no con nuevas ideas, sino tratando de destrozar las ideas de otros, que es la mayor parte del tiempo. Así que tú publicas un artículo y entonces hay una horda de expertos que intentan cargársela, cascándote todas tus ideas y apuntando a donde más duele; es un proceso demoledor. Cuando una idea sobrevive un año, te vuelves famosillo, o sea, de pronto tu nombre empieza a ser reconocido, y si una idea sobrevive 40 años, la gente te llama un genio. Es rarísimo

que una idea sobreviva 40 años sin haber sido demolida teóricamente. Las ideas han de funcionar y sobrevivir al escrutinio puramente de la lógica, y no estar en contradicción con cosas que ya sabemos, y que ya están experimentalmente comprobadas; a veces el análisis es muy difícil de hacer y lleva tiempo. El número de ideas que sobreviven a este proceso es pequeñísimo. Es decir, que cuando conectan el acelerador, en realidad solo hay dos, tres, cuatro ideas contendientes, no hay 2000. Esta idea, aunque parece una locura absoluta, ha sobrevivido 30 años de escrutinio; o sea, que es una idea que tomamos en serio y que no hemos sido capaces de matar, aunque seguimos intentándolo.

Para posicionar el papel de estas ideas de Hawking en el mapa de la física, voy a representar con una alegoría qué es lo que sabemos de física. Tenemos la materia, la geometría y la información. Hay un pilar que relaciona la materia con la geometría, que tardamos como 2500 años en construir. Los griegos descubrieron la geometría y se dieron cuenta de que para estudiar el tiempo había que interpretar el movimiento, pero se equivocaron en su interpretación, y hasta Newton y Galileo no quedó claro cómo pensar el movimiento. Ese edificio se culminó con Einstein, quien demostró primero que la materia y la energía es lo mismo; es decir, que ya hay una relación, porque la energía está relacionada con el movimiento. Luego, utilizando las ideas de la deformación del espacio a las que me he referido, vio que la gravitación hacía que la materia y la energía se hablaran; o sea, que de alguna manera unificó la geometría con la materia. Einstein culminó un pilar que llevó muchísimo tiempo.

Hay otro pilar que se hizo mucho más rápido. Durante muchos años no teníamos ni idea de la estructura de la materia, pero en los dos últimos siglos, hemos básicamente resuelto el

problema de la estructura de la materia, en el sentido de que la hemos reducido a codificar información en partículas elementales, que son unos objetos muy simples que tienen muy poquitos estados. Son como una construcción de Lego maravillosa que hemos entendido muy bien y que son el pilar de la física cuántica. Esa es la estructura actual de la física.

Entonces, lo que hizo Hawking fue escribir una fórmula que relaciona la información con la geometría —el número de partículas cuánticas que tiene un objeto que es puramente geométrico, el agujero negro. O sea, empezó a edificar una nueva parte del triángulo que de alguna forma unifica la física. Debería haber una forma directa de hablar de geometría e información. Esta parte está en construcción, pero Hawking y sus amigos pusieron la primera piedra en cierto modo. No me gusta personalizar tampoco en Hawking, que es un personaje icónico, porque este no es un trabajo en solitario ni mucho menos, es un trabajo colectivo.

Como epílogo, voy a recordar que cuando una idea en física es buena, suele ocurrir que encuentra más de una aplicación, es decir, es como si a la naturaleza le gustara utilizar buenas ideas en diferentes sitios. No sabemos muy bien por qué es esto, pero ocurre con cierta frecuencia. Así que voy a hablar de una cosa totalmente diferente, absolutamente apasionante también y que representa probablemente el mayor misterio que tiene la física actualmente sobre la mesa, que es el problema de la energía oscura. El mismo Einstein que nos habló de la deformación del espacio, también se inventó una idea un tanto loca, por razones equivocadas en su momento, pero que al final acabó siendo una gran idea de nuevo. Einstein se dio cuenta de que si el vacío tuviera energía, si tuviera sentido el concepto de energía de vacío —de que no sea cero la energía del vacío, sino que tenga una cierta tensión o energía

interna-, lo que pasaría es que el espacio se dilataría y se expandiría a un ritmo constante, de tal forma que la cantidad de espacio que se crea, crece exponencialmente—porque al cabo de un rato se multiplica por dos; al cabo de otro rato se multiplica por dos otra vez, que ya son cuatro; al cabo del mismo tiempo se multiplica otra vez por dos, es decir, ahora ya se multiplica por ocho, y así. En un espacio donde tienes energía en el vacío, ese espacio se dilata y crece en todas direcciones de manera acelerada exponencialmente. Es como un bizcocho con pasas. Tú tienes un bizcocho con pasas, lo metes en el horno y entonces empieza a crecer; lo que pasa es que se crea más bizcocho y las pasas no se mueven, pero se separan unas de otras. Están paradas, pero simplemente son empujadas por el bizcocho. Esta es la manera en la que se describe hoy en día lo que está pasando en el universo. En el universo ahora mismo, cuando miramos las galaxias, vemos que se están alejando todas unas de otras, esta idea de que el universo se expande es una cosa que sabemos desde hace mucho tiempo, desde los años 20 del siglo XX. Se pensaba que la expansión de las galaxias era una reliquia del Big Bang, es decir, que habían sido empujadas por el Big Bang y que iban así inercialmente, simplemente a la deriva. De hecho, se esperaba que se frenaran un poquito, muy lentamente, pero que se frenaran algo. ¿Por qué? Porque a fin de cuentas se atraen gravitacionalmente. Muy poquito porque están muy lejos, pero esa fuerza de atracción gravitacional debería hacer que frenaran un poquito, y durante décadas los astrónomos estuvieron intentando detectar ese efecto, comprobar que efectivamente se estaban frenando un poquito. La sorpresa fue mayúscula hace 20 años cuando descubrieron que no solo no están frenando sino que están acelerando. Eso quiere decir que la expansión del universo no es solo una reliquia del Big Bang, sino que hay un motor que está empujando ahora mismo. Una galaxia que ves hoy alejarse de ti

a una cierta velocidad, mañana se va a alejar más rápido, es decir, que hay algo que está empujando. La manera en la que describimos eso, sin tirar la teoría de Einstein a la basura—de hecho, la teoría de Einstein lo describe perfectamente—, es asumir que existe una energía en el vacío. El vacío tiene una energía que no es cero. De hecho, la energía necesaria para explicar el movimiento en gran escala del universo es, más o menos, un protón por un cubo de fregona. Es decir, si consideráis el volumen de un cubo de fregona, que son como diez litros, y pones un protón ahí, la densidad equivalente de un protón por cada diez litros es, más o menos, la densidad de energía en el vacío necesaria para explicar la expansión acelerada del universo que vemos. Es un gran misterio, no sabemos muy bien por qué esto es así, pero es un hecho.

Uno podría preguntarse qué pasaría si el vacío cuántico tuviera energía, es decir, si estas fluctuaciones en vez de promediar a cero, promediaran a una cantidad positiva—hubiera una densidad positiva de energía—; qué le pasaría al vacío cuántico cuando se conecta la idea de Einstein, la gravitación—porque Einstein dice que se tiene que expandir todo—; qué pasaría si el vacío cuántico tuviera una energía enorme, de forma que la expansión fuera muy rápida. Pues lo que pasaría es exactamente lo mismo que pasa en el tubo del agujero negro: el espacio se estiraría, ahora en todas las direcciones a la vez—no solo en una dirección—, entonces las partículas que se generan por fluctuaciones cuánticas, se ven separadas y permanecen, no se aniquilan. Así que se producen fluctuaciones de energía permanentes, grumos de energía permanentes que están siendo alejados unos de otros constantemente, una especie de máquina de producir fluctuaciones de energía que permanecen. No se han podido aniquilar cuando estaban cerca en el régimen cuántico y ahora son grandes regiones que difieren en densidad de energía.

Tenemos una foto del universo cuando tenía 400 mil años más o menos de edad. A través de un código de colores se representaron las zonas calientes y las zonas más frías. En ellas pudimos identificar unas manchas pequeñas, como unos grumitos. Si fuéramos allí con una máquina del tiempo y nos colocáramos allí con nuestra nave espacial mirando por la ventana, veríamos que cada uno de estos grumos tiene un tamaño del orden de cinco veces la vía láctea; o sea, tienen más o menos como 500 mil años luz —esa es la escala real del tamaño de esos grumitos. Esa foto fue sacada por un satélite mirando la luz más vieja que hay —lo que quedó del Big Bang cuando el universo estaba a 3000 grados. Esa foto se empezó a sacar hace 20 años con un satélite que se llamaba COBE; más tarde un satélite llamado WMAP mejoró la resolución; y el último fue Planck, que hace unos seis años sacó una foto de más resolución. Ahora tenemos un mapa de fluctuaciones de temperaturas en el cielo en el que también podemos ver una serie de grumos, que tienen un tamaño más o menos como la luna. Sabemos que estos grumos son el origen de las galaxias, o sea, que con el tiempo cada uno de esos grumos forman súper cúmulos de galaxias, más o menos. Tenemos una comprensión razonable de esto, ciertas hipótesis. Esta idea de que las fluctuaciones que dan origen a las galaxias se originan en fluctuaciones cuánticas en un época en que hay mucha energía en el vacío, se llama Teoría de la Inflación Cósmica —una de estas famosas teorías acerca de cómo funcionaba el Big Bang. Se vio una cosa muy interesante. Al igual que dije antes que las partículas fluctuaban con correlaciones, como un baile coreografiado, aquí también hay correlaciones ocultas y estas correlaciones son las mismas que aparecen en el vacío cuántico. Es decir, que la estadística de estas manchas es la misma que la estadística de los pares partícula-anti-partícula. Y esa es la idea de Hawking y Mukhanov. Finalmente,

Bio



JOSÉ LUIS FERNÁNDEZ BARBÓN

Es Doctor por la Universidad Autónoma de Madrid, desde 1992. Experto en teoría cuántica de los agujeros negros y teoría de cuerdas. En la década de los 90 trabajó como investigador asociado en las Universidades de Princeton (EEUU), Utrecht (NL) y el Laboratorio Europeo de Física de Partículas de Ginebra (CERN). Fue investigador de plantilla de la División de Física Teórica del CERN entre 2000 y 2005. Desde 2005 es investigador científico del Instituto de Física Teórica IFT Universidad Autónoma de Madrid - Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

el efecto Hawking, esta idea de que la dinámica geométrica del espacio puede producir fluctuaciones de partículas, acaba teniendo aplicaciones mucho más allá de la región donde fueron inventadas, y para algo tan fundamental y tan importante como la generación de estructuras en el universo. Las ideas de Hawking están a una cierta distancia no muy grande, de una posible confirmación experimental. No podemos repetir la formación del universo una y otra vez para comprobarlo muchas veces, pero los cálculos indican que la estadística de esas fluctuaciones es exactamente la que resulta de aplicar las fórmulas de Hawking y Mukhanov a una situación en la que tienes dominación de energía oscura.