

## Capítulo 9

### LA FLECHA DEL TIEMPO

En los capítulos anteriores hemos visto cómo nuestras concepciones sobre la naturaleza del tiempo han cambiado con los años. Hasta comienzos de este siglo la gente creía en el tiempo absoluto. Es decir, en que cada suceso podría ser etiquetado con un número llamado «tiempo» de una forma única, y todos los buenos relojes estarían de acuerdo en el intervalo de tiempo transcurrido entre dos sucesos. Sin embargo, el descubrimiento de que la velocidad de la luz resultaba ser la misma para todo observador, sin importar cómo se estuviese moviendo éste, condujo a la teoría de la relatividad, y en ésta tenía que abandonarse la idea de que había un tiempo absoluto único. En lugar de ello, cada observador tendría su propia medida del tiempo, que sería la registrada por un reloj que él llevase consigo: relojes correspondientes a diferentes observadores no coincidirían necesariamente. De este modo, el tiempo se convirtió en un concepto más personal, relativo al observador que lo medía.

Cuando se intentaba unificar la gravedad con la mecánica cuántica se tuvo que introducir la idea de tiempo «imaginario». El tiempo imaginario es indistinguible de las direcciones espaciales. Si uno puede ir hacia el norte, también puede dar la vuelta y dirigirse hacia el sur; de la misma forma, si uno puede ir hacia adelante en el tiempo imaginario, debería poder también dar la vuelta e ir hacia atrás. Esto significa que no puede haber ninguna diferencia importante entre las direcciones hacia adelante y hacia atrás del tiempo imaginario. Por el contrario, en el tiempo «real», hay una diferencia muy grande entre las direcciones hacia adelante y hacia atrás, como todos sabemos. ¿De dónde proviene esta diferencia entre el pasado y el futuro? ¿Por qué recordamos el pasado pero no el futuro?

Las leyes de la ciencia no distinguen entre el pasado y el futuro. Con más precisión, como se explicó anteriormente, las leyes de la ciencia no se modifican bajo la combinación de las operaciones (o simetrías) conocidas como C, P y T. (C significa cambiar partículas por antipartículas. P significa tomar la imagen especular, de modo que izquierda y derecha se intercambian. T significa invertir la dirección de movimiento de todas las partículas: en realidad, ejecutar el movimiento hacia atrás.) Las leyes de la ciencia que gobiernan el comportamiento de la materia en todas las situaciones normales no se modifican bajo la combinación de las dos operaciones C y P por sí solas. En otras palabras, la vida sería exactamente la misma para los habitantes de otro planeta que fuesen imágenes especulares de nosotros y que estuviesen hechos de antimateria en vez de materia.

Si las leyes de la ciencia no se pueden modificar por la combinación de las operaciones C y P, y tampoco por la combinación C, P y T, tienen también que permanecer inalteradas bajo la operación T sola. A pesar de todo, hay una gran diferencia entre las direcciones hacia adelante y hacia atrás del tiempo real en la vida ordinaria. Imagine un vaso de agua cayéndose de una mesa y rompiéndose en pedazos en el suelo. Si usted lo filma en película, puede decir fácilmente si está siendo proyectada hacia adelante o hacia atrás. Si la proyecta hacia atrás verá los pedazos repentinamente reunirse del suelo y saltar hacia atrás para formar un vaso entero sobre la mesa. Usted puede decir que la película está siendo proyectada hacia atrás porque este tipo de comportamiento nunca se observa en la vida ordinaria. Si se observase, los fabricantes de vajillas perderían el negocio.

La explicación que se da usualmente de por qué no vemos vasos rotos recomponiéndose ellos solos en el suelo y saltando hacia atrás sobre la mesa, es que lo prohíbe la segunda ley de la termodinámica. Esta ley dice que en cualquier sistema cerrado el desorden, o la entropía, siempre aumenta con el tiempo. En otras palabras, se trata de una forma de la ley de Murphy: ¡las cosas siempre tienden a ir mal! Un vaso intacto encima de una mesa es un estado de orden elevado, pero un vaso roto en el suelo es un estado desordenado. Se puede ir desde el vaso que está sobre la mesa en el pasado hasta el vaso roto en el suelo en el futuro, pero no así al revés.

El que con el tiempo aumente el desorden o la entropía es un ejemplo de lo que se llama una flecha del tiempo, algo que distingue el pasado del futuro dando una dirección al tiempo. Hay al menos tres flechas del tiempo diferentes. Primeramente, está la flecha termodinámica, que es la dirección del tiempo en la que el desorden o la entropía aumentan. Luego está la flecha psicológica. Esta es la dirección en la que nosotros sentimos que pasa el tiempo, la dirección en la que recordamos el pasado pero no el futuro. Finalmente, está la flecha cosmológica. Esta es la dirección del tiempo en la que el universo está expandiéndose en vez de contrayéndose.

En este capítulo discutiré cómo la condición de que no haya frontera para el universo, junto con el principio antrópico débil, puede explicar por qué las tres flechas apuntarán en la misma dirección y, además, por qué debe existir una flecha del tiempo bien definida. Argumentaré que la flecha psicológica está determinada por la flecha termodinámica, y que ambas flechas apuntan siempre necesariamente en la misma dirección. Si se admite la condición de que no haya frontera para el universo, veremos que tienen que existir flechas termodinámica y cosmológica del tiempo bien definidas, pero que no apuntarán en la misma dirección durante toda la historia del

universo. No obstante razonaré que únicamente cuando apuntan en la misma dirección es cuando las condiciones son adecuadas para el desarrollo de seres inteligentes que puedan hacerse la pregunta: ¿por qué aumenta el desorden en la misma dirección del tiempo en la que el universo se expande?

Me referiré primero a la flecha termodinámica del tiempo. La segunda ley de la termodinámica resulta del hecho de que hay siempre muchos más estados desordenados que ordenados. Por ejemplo, consideremos las piezas de un rompecabezas en una caja. Hay un orden, y sólo uno, en el cual las piezas forman una imagen completa. Por otra parte, hay un número muy grande de disposiciones en las que las piezas están desordenadas y no forman una imagen.

Supongamos que un sistema comienza en uno de entre el pequeño número de estados ordenados. A medida que el tiempo pasa el sistema evolucionará de acuerdo con las leyes de la ciencia y su estado cambiará. En un tiempo posterior es más probable que el sistema esté en un estado desordenado que en uno ordenado, debido a que hay muchos más estados desordenados. De este modo, el desorden tenderá a aumentar con el tiempo si el sistema estaba sujeto a una condición inicial de orden elevado.

Imaginemos que las piezas del rompecabezas están inicialmente en una caja en la disposición ordenada en la que forman una imagen. Si se agita la caja, las piezas adquirirán otro orden que será, probablemente, una disposición desordenada en la que las piezas no forman una imagen propiamente dicha, simplemente porque hay muchísimas más disposiciones desordenadas. Algunos grupos de piezas pueden todavía formar partes correctas de la imagen, pero cuanto más se agite la caja tanto más probable será que esos grupos se deshagan y que las piezas se hallen en un estado completamente revuelto, en el cual no formen ningún tipo de imagen. Por lo tanto, el desorden de las piezas aumentará probablemente con el tiempo si las piezas obedecen a la condición inicial de comenzar con un orden elevado.

Supóngase, sin embargo, que Dios decidió que el universo debe terminar en un estado de orden elevado sin importar de qué estado partiese. En los primeros momentos, el universo habría estado probablemente en un estado desordenado. Esto significaría que el desorden disminuiría con el tiempo. Usted vería vasos rotos, recomponiéndose ellos solos y saltando hacia la mesa. Sin embargo, ningún ser humano que estuviese observando los vasos estaría viviendo en un universo en el cual el desorden disminuyese con el tiempo. Razonaré que tales seres tendrían una flecha psicológica del tiempo que estaría apuntando hacia atrás. Esto es, ellos recordarían sucesos en el futuro y no recordarían sucesos en el pasado. Cuando el

vaso estuviese roto lo recordarían recompuesto sobre la mesa, pero cuando estuviese recompuesto sobre la mesa no lo recordarían estando en el suelo.

Es bastante difícil hablar de la memoria humana, porque no conocemos cómo funciona el cerebro en detalle. Lo conocemos todo, sin embargo, sobre cómo funcionan las memorias de ordenadores. Discutiré por lo tanto la flecha psicológica del tiempo para ordenadores. Creo que es razonable admitir que la flecha para ordenadores es la misma que para humanos. Si no lo fuese, ¡se podría tener un gran éxito financiero en la bolsa poseyendo un ordenador que recordase las cotizaciones de mañana!

Una memoria de ordenador consiste básicamente en un dispositivo que contiene elementos que pueden existir en uno cualquiera de dos estados. Un ejemplo sencillo es un ábaco. En su forma más simple, éste consiste en varios hilos; en cada hilo hay una cuenta que puede ponerse en una de dos posiciones.

Antes de que un número sea grabado en una memoria de ordenador, la memoria está en un estado desordenado, con probabilidades iguales para los dos estados posibles. (Las cuentas del ábaco están dispersas aleatoriamente en los hilos del ábaco.) Después de que la memoria interactúa con el sistema a recordar, estará claramente en un estado o en el otro, según sea el estado del sistema. (Cada cuenta del ábaco estará a la izquierda o a la derecha del hilo del ábaco.) De este modo, la memoria ha pasado de un estado desordenado a uno ordenado. Sin embargo, para estar seguros de que la memoria está en el estado correcto es necesario gastar una cierta cantidad de energía (para mover la cuenta o para accionar el ordenador, por ejemplo). Esta energía se disipa en forma de calor, y aumenta la cantidad de desorden en el universo. Puede demostrarse que este aumento del desorden es siempre mayor que el aumento del orden en la propia memoria. Así, el calor expelido por el refrigerador del ordenador asegura que cuando graba un número en la memoria, la cantidad total de desorden en el universo aumenta a pesar de todo. La dirección del tiempo en la que un ordenador recuerda el pasado es la misma que aquella en la que el desorden aumenta.

Nuestro sentido subjetivo de la dirección del tiempo, la flecha psicológica del tiempo, está determinado por tanto dentro de nuestro cerebro por la flecha termodinámica del tiempo. Exactamente igual que un ordenador, debemos recordar las cosas en el orden en que la entropía aumenta. Esto hace que la segunda ley de la termodinámica sea, casi trivial. El desorden aumenta con el tiempo porque nosotros medimos el tiempo en la dirección en la que el desorden crece. ¡No se puede hacer una apuesta más segura que ésta!

Pero ¿por qué debe existir siquiera la flecha termodinámica del tiempo? o, en otras palabras, ¿por qué debe estar el universo en un estado de orden elevado en un extremo del tiempo, el extremo que llamamos el pasado? ¿Por qué no está en un estado de completo desorden en todo momento? Después de todo, esto podría parecer más probable. ¿Y por qué la dirección del tiempo en la que el desorden aumenta es la misma en la que el universo se expande?

En la teoría clásica de la relatividad general no se puede predecir cómo habría comenzado el universo, debido a que todas las leyes conocidas de la ciencia habrían fallado en la singularidad del *big bang*. El universo podría haber empezado en un estado muy suave y ordenado. Esto habría conducido a unas flechas termodinámica y cosmológica del tiempo bien definidas, como observamos. Pero igualmente podría haber comenzado en un estado muy grumoso y desordenado. En ese caso, el universo estaría ya en un estado de desorden completo, de modo que el desorden no podría aumentar con el tiempo. O bien permanecería constante, en cuyo caso no habría flecha termodinámica del tiempo bien definida, o bien disminuiría, en cuyo caso la flecha termodinámica del tiempo señalaría en dirección opuesta a la flecha cosmológica. Ninguna de estas posibilidades está de acuerdo con lo que observamos. Sin embargo, como hemos visto, la relatividad general clásica predice su propia ruina. Cuando la curvatura del espacio-tiempo se hace grande, los efectos gravitatorios cuánticos se volverán importantes, y la teoría clásica dejará de constituir una buena descripción del universo. Debe emplearse una teoría cuántica de la gravedad para comprender cómo comenzó el universo.

En una teoría cuántica de la gravedad, como vimos en el capítulo anterior, para especificar el estado del universo habría que decir aún cómo se comportarían las historias posibles del universo en el pasado en la frontera del espacio-tiempo. Esta dificultad de tener que describir lo que no se sabe, ni se puede saber, podría evitarse únicamente si las historias satisficieran la condición de que no haya frontera: son finitas en extensión pero no tienen fronteras, bordes o singularidades. En este caso, el principio del tiempo sería un punto regular, suave, del espacio-tiempo, y el universo habría comenzado su expansión en un estado muy suave y ordenado. No podría haber sido completamente uniforme, porque ello violaría el principio de incertidumbre de la teoría cuántica. Tendría que haber habido pequeñas fluctuaciones en la densidad y en las velocidades de las partículas. La condición de que no haya frontera, sin embargo, implicaría que estas fluctuaciones serían tan pequeñas como fuese posible, con tal de ser consistentes con el principio de incertidumbre.

El universo habría comenzado con un período de expansión exponencial o «inflacionario», en el que habría aumentado su tamaño en un factor muy grande.

Durante esta expansión las fluctuaciones en la densidad habrían permanecido pequeñas al principio, pero posteriormente habrían empezado a crecer. Las regiones en las que la densidad fuese ligeramente más alta que la media habrían visto frenada su expansión por la atracción gravitatoria de la masa extra. Finalmente, tales regiones dejarían de expandirse y se colapsarían para formar galaxias, estrellas y seres como nosotros. El universo, al comienzo en un estado suave y ordenado, se volvería grumoso y desordenado a medida que el tiempo pasase. Lo que explicaría la existencia de la flecha termodinámica del tiempo.

Pero ¿qué ocurriría (y cuándo) si el universo dejase de expandirse y empezase a contraerse? ¿Se invertiría la flecha termodinámica, y el desorden empezaría a disminuir con el tiempo? Esto llevaría a todo tipo de posibilidades de ciencia-ficción para la gente que sobreviviese la fase en expansión y llegase hasta la fase en contracción. ¿Verían vasos rotos recomponiéndose ellos solos en el suelo y saltando sobre la mesa? ¿Serían capaces de recordar las cotizaciones de mañana y hacer una fortuna en la bolsa? Podría parecer algo académico preocuparse acerca de lo que ocurriría cuando el universo se colapsase de nuevo, ya que no empezará a contraerse al menos durante otros diez mil millones de años. Pero existe un camino más rápido para averiguar qué ocurriría: saltar dentro de un agujero negro. El colapso de una estrella para formar un agujero negro es bastante parecido a las últimas etapas del colapso de todo el universo. Por tanto si el desorden fuese a disminuir en la fase contractiva del universo, podría esperarse también que disminuyese dentro de un agujero negro. De este modo, tal vez un astronauta que cayese en uno sería capaz de hacer dinero en la ruleta recordando adónde fue la bola antes de que él hiciese su apuesta. (Desafortunadamente, sin embargo, no tendría tiempo de jugar antes de convertirse en *spaghetti*. Ni sería capaz de decirnos nada acerca de la inversión de la flecha termodinámica, ni de depositar sus ganancias, porque estaría atrapado detrás del horizonte de sucesos del agujero negro.)

Al principio, yo creí que el desorden disminuiría cuando el universo se colapsase de nuevo. Pensaba que el universo tenía que retornar a un estado suave y ordenado cuando se hiciese pequeño otra vez. Ello significaría que la fase contractiva sería como la inversión temporal de la fase expansiva. La gente en la fase contractiva viviría sus vidas hacia atrás: morirían antes de nacer y rejuvenecerían conforme el universo se contrajese.

Esta idea es atractiva porque conlleva una bonita simetría entre las fases expansiva y contractiva. Sin embargo, no puede ser adoptada sola, independiente de otras ideas sobre el universo. La cuestión es: ¿se deduce esta idea de la condición de que no haya frontera, o es inconsistente con esa condición? Como dije, al principio

pensé que la condición de no frontera implicaría en realidad que el desorden disminuiría en la fase contractiva. Llegué a una conclusión errónea en parte por la analogía con la superficie de la Tierra. Si se hace corresponder el principio del universo con el polo norte, entonces el final del universo debería ser similar al principio, del mismo modo que el polo sur es similar al norte. Sin embargo, los polos norte y sur corresponden al principio y al final del universo en el tiempo imaginario. El principio y el final en el tiempo real pueden ser muy diferentes el uno del otro. Me despistó también el trabajo que yo había hecho sobre un modelo simple del universo, en el cual la fase colapsante se parecía a la inversión temporal de la fase expansiva. Sin embargo, un colega mío, Don Page, de la Universidad de Penn State, señaló que la condición de que no haya frontera no exigía que la fase contractiva fuese necesariamente la inversión temporal de la fase expansiva. Además, uno de mis alumnos, Raymond Laflamme, encontró que en un modelo ligeramente más complicado el colapso del universo era muy diferente de la expansión. Me di cuenta de que había cometido un error: la condición de que no haya frontera implicaba que el desorden continuaría de hecho aumentando durante la contracción. Las flechas termodinámica y psicológica del tiempo no se invertirían cuando el universo comenzara a contraerse de nuevo, o dentro de los agujeros negros.

¿Qué se debe hacer cuando uno se da cuenta de que ha cometido un error como éste? Algunos nunca admiten que están equivocados y continúan buscando nuevos argumentos, a menudo inconsistentes, para apoyar su tesis (como hizo Eddington al oponerse a la teoría de los agujeros negros). Otros pretenden, en primer lugar, no haber apoyado nunca realmente el enfoque incorrecto o que, si lo hicieron, fue sólo para demostrar que era inconsistente. Me parece mucho mejor y menos confuso si se admite en papel impreso que se estaba equivocado. Un buen ejemplo lo constituyó Einstein, quien llamó a la constante cosmológica, que había introducido cuando estaba tratando de construir un modelo estático del universo, el error más grande de su vida.

Volviendo a la flecha del tiempo, nos queda la pregunta: ¿por qué observamos que las flechas termodinámica y cosmológica señalan en la misma dirección? o en otras palabras ¿por qué aumenta el desorden en la misma dirección del tiempo en la que el universo se expande? Si se piensa que el universo se expandirá y que después se contraerá de nuevo, como la propuesta de no frontera parece implicar, surge la cuestión de por qué debemos estar en la fase expansiva en vez de en la fase contractiva. Esta cuestión puede responderse siguiendo el principio antrópico débil. Las condiciones en la fase contractiva no serían adecuadas para la existencia de seres inteligentes que pudiesen hacerse la pregunta: ¿por qué está aumentando el desorden en la misma dirección del tiempo en la que el universo se está expandiendo? La inflación en las etapas tempranas del universo, que la propuesta

de no frontera predice, significa que el universo tiene que estar expandiéndose a una velocidad muy próxima a la velocidad crítica a la que evitaría colapsarse de nuevo, y de este modo no se colapsará en mucho tiempo. Para entonces todas las estrellas se habrán quemado, y los protones y los neutrones se habrán desintegrado probablemente en partículas ligeras y radiación. El universo estaría en un estado de desorden casi completo. No habría ninguna flecha termodinámica clara del tiempo. El desorden no podría aumentar mucho debido a que el universo estaría ya en un estado de desorden casi completo. Sin embargo, una flecha termodinámica clara es necesaria para que la vida inteligente funcione. Para sobrevivir, los seres humanos tienen que consumir alimento, que es una forma ordenada de energía, y convertirlo en calor, que es una forma desordenada de energía. Por tanto, la vida inteligente no podría existir en la fase contractiva del universo. Esta es la explicación de por qué observamos que las flechas termodinámica y cosmológica del tiempo señalan en la misma dirección. No es que la expansión del universo haga que el desorden aumente. Más bien se trata de que la condición de no frontera hace que el desorden aumente y que las condiciones sean adecuadas para la vida inteligente sólo en la fase expansiva.

Para resumir, las leyes de la ciencia no distinguen entre las direcciones hacia adelante y hacia atrás del tiempo. Sin embargo, hay al menos tres flechas del tiempo que sí distinguen el pasado del futuro. Son la flecha termodinámica, la dirección del tiempo en la cual el desorden aumenta; la flecha psicológica, la dirección del tiempo según la cual recordamos el pasado y no el futuro; y la flecha cosmológica, la dirección del tiempo en la cual el universo se expande en vez de contraerse. He mostrado que la flecha psicológica es esencialmente la misma que la flecha termodinámica, de modo que las dos señalarán siempre en la misma dirección. La propuesta de no frontera para el universo predice la existencia de una flecha termodinámica del tiempo bien definida, debido a que el universo tuvo que comenzar en un estado suave y ordenado. Y la razón de que observemos que esta flecha termodinámica coincide con la flecha cosmológica es que seres inteligentes sólo pueden existir en la fase expansiva. La fase contractiva sería inadecuada debido a que no posee una flecha termodinámica clara del tiempo. El progreso de la raza humana en la comprensión del universo ha creado un pequeño rincón de orden en un universo cada vez más desordenado. Si usted recuerda cada palabra de este libro, su memoria habrá grabado alrededor de dos millones de unidades de información: el orden en su cerebro habrá aumentado aproximadamente dos millones de unidades. Sin embargo, mientras usted ha estado leyendo el libro, habrá convertido al menos mil calorías de energía ordenada, en forma de alimento, en energía desordenada, en forma de calor que usted cede al aire de su alrededor a través de convección y sudor. Esto aumentará el desorden del universo en unos veinte billones de billones de unidades - o aproximadamente diez millones de



billones de veces el aumento de orden de su cerebro y eso si usted recuerda *todo* lo que hay en este libro. En el próximo capítulo trataré de aumentar un poco más el orden de ese rincón, explicando cómo se está tratando de acoplar las teorías parciales que he descrito para formar una teoría unificada completa que lo explicaría todo en el universo.