

¿POR QUÉ EL TIEMPO TIENE UNA SOLA DIRECCIÓN?

—*Observa el camino, ¿a quién ves en él?*—*Le preguntó el rey a Alise.*
—*¡A "nadie"!*—*respondió ella.*
—*¿Cómo quisiera tener semejante visión, para ver a "Nadie" desde semejante distancia!*—*Replicó el rey con envidia.*

Las propiedades del tiempo todavía no están determinadas en muchos aspectos y sólo en los últimos años se han dado a conocer algunas de sus facetas. En las siguientes líneas expondré un conjunto de hipótesis y sugerencias basados en los alcances de la ciencia moderna.

Comenzaré con una pregunta ¿por qué el tiempo va siempre del pasado al futuro? Por el momento no existe una clara y convincente respuesta a esta pregunta, ni siquiera ha sido confirmada por la gran mayoría de los especialistas. Los físicos son quienes más han indagado al tiempo; en sus investigaciones se han percatado de que las leyes de la naturaleza en muchos aspectos no tienen preferencia por la dirección del tiempo.

La mayoría de nosotros nos hemos dado cuenta de esta cualidad al observar problemas sencillos de la mecánica. Por ejemplo, si una bola de billar rebota en algún borde de la mesa bajo un ángulo cualquiera, ésta continúa su movimiento al rebotar. Ahora, mentalmente podemos invertir el tiempo y representar a la bola de billar moviéndose en sentido contrario. Esto es análogo a cuando se filma una película

MÁXIMO A. AGÜERO GRANADOS*

de este movimiento y luego se muestra en la pantalla en orden inverso. Este truco muchas veces lo usan los directores de cine cuando quieren filmar la caída del héroe desde un caballo, o cuando se quiere mostrar lo hábil que es tal o cual personaje de las películas en una acción de mucho peligro (un buen ejemplo son las películas de Charles Chaplin). Volviendo al tema, al invertir la secuencia del movimiento de la bola de billar las leyes de la mecánica son las mismas.

Otro ejemplo más complicado es el movimiento de los planetas alrededor del Sol, cuyas leyes fueron descubiertas por Kepler. Si cambiamos la dirección del tiempo (los físicos dicen que cambian el signo del tiempo de $+ a -$), observaremos que el planeta se moverá por la misma órbita pero en sentido contrario. Las leyes de Kepler se cumplirán también en este caso.

Todo esto tuvo una generalización cuando Newton presentó sus famosas leyes de movimiento de los cuerpos. Así, por las leyes de la mecánica, podemos calcular el futuro de los movimientos planetarios y predecir

eclipses sin hacer uso de la astrología, de la pseudociencia. Entonces las leyes de Newton describen al movimiento en cualquier dirección del tiempo —sea hacia el pasado o hacia el futuro— no definen la dirección. Pero no sólo la mecánica satisface esta condición, sino también la electrodinámica y las leyes especiales y generales de la teoría de la relatividad.

Así, podemos calcular el futuro y el pasado del universo al conocer la posición y la velocidad de todas las partículas en el universo definido en algún momento dado (los físicos dirán que son las condiciones iniciales). Estas consideraciones fueron hechas inicialmente por el fundador de la mecánica celeste P. Laplace (1749-1827), matemático y astrónomo francés. Esta teoría era la base de las especulaciones filosóficas acerca del determinismo del futuro del universo y por mucho tiempo fue considerada como la fundamental de los procesos físicos.

Pero, ¿será esto realmente así? En nuestra vida cotidiana nos topamos con el hecho de que el pasado ya su-

**Facultad de Ciencias, UAEM.*
Correo electrónico: mag@coatepec.uaemex.mx

cedió y no podemos cambiarlo. Si una taza de café con leche se cayó de la mesa y se hizo trizas, dejémosla correr, ya no podremos obtener la misma taza con la misma leche. No podemos observar el fenómeno inverso: ver que los pedazos de la taza se junten poco a poco al igual que el líquido desparramado hasta formar una taza con leche y que se eleve desde el piso hasta llegar al lugar de donde cayó. No hay pues simetría en el flujo del tiempo, todos los procesos observables van del pasado al futuro. Esto implica que el fenómeno es anisotrópico. Pero muchas leyes del movimiento de la materia sí poseen esta simetría, llamada por los expertos T-invariancia, o sea, invariancia en el tiempo.

En 1964 los físicos americanos James W. Cronin y Val L. Fitch descubrieron un proceso que no posee T-invariancia, en el que sí importa mucho la dirección del tiempo. Por este descubrimiento ellos obtuvieron el premio Nobel de física. Sin caer en detalles, estos científicos observaron que la desintegración de la partícula neutral llamada K-meson se realiza de tal manera que "siente" la dirección del tiempo, es decir, viola la T-invariancia. Pero, ¿será que estos procesos elementales explican el porqué tenemos incluso a nivel cósmico una sola dirección del tiempo?

Desde hace años los especialistas se dieron cuenta de que el tiempo es irreversible en procesos más complejos. Un ejemplo de proceso irreversible es un recipiente lleno de agua donde se agrega una gota de tinta que rápidamente se dispersa y, después de algún tiempo, la tinta se distribuye por todo el recipiente. Este proceso no puede observarse en sentido contrario, es decir, que la tinta se vuelva a juntar en una sola gota, debido a que las leyes por las que se mueven e interactúan las partículas en este fenómeno son T-invariantes. Si cambiáramos el sentido del tiempo todos los procesos dentro del recipiente ocurrirían en sen-

tido contrario y tendríamos la gota reunida. En teoría este proceso es posible, pero en la práctica nunca sucede. La cuestión es que la formación de la tinta en gota tiene cierta probabilidad, pero es demasiado pequeña.

Analicemos otro caso, al calentar un pedazo de hierro y después meterlo en agua, el hierro se enfriará y el agua se calentará hasta que sus temperaturas se igualen. Siempre ocurre así, nunca se ha observado que el calor del agua fría pase al pedazo de hierro caliente y así se caliente aún más. Todo esto a pesar de que el paso del calor del agua fría al hierro no viola las leyes de conservación de la energía.

¿Por qué en semejantes procesos ocurre la irreversibilidad si son la suma de movimientos de partículas que son reversibles en el tiempo?, ¿dónde se pierde esa reversibilidad? En 1850 el físico alemán P. Clausius y en 1851 el físico inglés B. Thomson, dieron una nueva forma de la ley que gobierna los procesos térmicos conocida como la segunda ley de la termodinámica. Para ellos, este principio se formula así: "En la naturaleza es imposible un proceso cuyo único resultado fuese un trabajo mecánico realizado a expensas del enfriamiento de un reservorio caliente". O sea que no es posible la transferencia total del calor en energía mecánica y/o en otros tipos de energía. Esto quiere decir que si aislamos a un sistema, al final todo tipo de energía se transformará en calor y ocurrirá lo que se llama equilibrio termodinámico.

Las ideas acerca de la termodinámica de Clausius fueron desarrolladas aún más por el físico austríaco L. Boltzmann, quien encontró que el calor se debe a un movimiento caótico de los átomos o moléculas que conforman los cuerpos. Esto quiere decir que el aumento del desorden, del caos, es imposible detenerlo debido a la casualidad de los movimientos de las

partículas (si sobre el sistema no actúan fuerzas externas).

La medida del desorden se llama entropía. La transformación de algunos tipos de energía en calor conlleva al aumento de la entropía. Cuando algún tipo de energía se han transformado en calorífica y ésta a su vez se ha distribuido por todo el sistema, a esta situación se le llama estado de máxima entropía.

Cuando se tiene un sistema cerrado de muchas partículas, debido a la casualidad de sus movimientos, irresistiblemente llegamos al caos. En el caso del pedazo de hierro caliente y del agua fría es mucho más probable que las moléculas del hierro caliente —que tienen mayor energía cinética— transmitan su energía al interactuar con las del agua. Así, las leyes probabilísticas al considerar interacciones aleatorias determinan la dirección de procesos irreversibles.

Ahora bien, si deseamos introducir orden en el sistema debemos actuar sobre él desde afuera. Por ejemplo, es posible lograr que el calor pase del agua fría al hierro caliente. ¡Así trabajan los refrigeradores domésticos! En ellos el calor de la cámara fría con menor temperatura pasa a la atmósfera exterior cuya temperatura es mayor, pero para que esto suceda es necesario que trabaje el motor del refrigerador, lo que significa consumir energía. Pero a pesar de que hemos hecho lo posible para que haya orden en el refrigerador, también hemos introducido más caos en la atmósfera, hemos hecho crecer la entropía. Clausius y Thomson, al extrapolar la termodinámica a todo nuestro universo, llegaron a la "teoría de la muerte térmica del universo" que se basa en el principio de que en el universo todos los tipos de energía deben de transformarse al final en calor que se distribuirá por todos los confines de él, después de lo cual ya no habrá movimiento de ninguna naturaleza. Aquí las leyes de conservación de energía no se violan

pero esa energía calorífica es incapaz de realizar cualquier trabajo. Esto será así siempre y cuando consideremos al universo como un sistema cerrado y podamos extrapolar las leyes de la termodinámica a las dimensiones del universo. En otras palabras, para todo el universo el intercambio de energía con algún otro sistema es imposible.

Pero estas conclusiones no son fiables, pues sabemos que en el universo la fuerza fundamental es la gravitatoria, es decir, que nuestro universo no es estacionario debido a que sigue en evolución después de una gran explosión. Siempre han ocurrido procesos bastante interesantes como nacimientos y evolución de mundos que de alguna manera no permiten ese fin térmico descrito más arriba. Incluso es posible que al existir estas fluctuaciones en el universo las direcciones en la flecha del tiempo sean indistinguibles. No obstante, la idea fundamental del crecimiento de la entropía parece ser cierta.

¿Será entonces la entropía la que rige la dirección del tiempo? Recordemos que el tiempo tiene una sola dirección en varios procesos fundamentales, en particular en la física de las partículas elementales. En todos los procesos que están separados unos de otros el transcurrir del tiempo siempre está en concordancia en "viajar" en una sola dirección: del pasado al futuro. ¿Por qué esta concordancia?

El físico inglés F. Hoyle supuso que la dirección del tiempo tiene mucho que ver con la gran explosión, con el *Big Bang*, y que está en dependencia directa con el crecimiento de las distancias entre las galaxias por la expansión del universo. Entonces la expansión del universo determina una flecha del tiempo que es la cosmológica, que también está dirigida del pasado al futuro. Pero en el universo el alejamiento de las galaxias distantes entre sí de ninguna manera influye en los procesos dentro de las estrellas, planetas, etcétera.

Además, en la naturaleza también existen ciertos procesos específicos que "sienten" el tiempo en una sola dirección. Éstos son los procesos psíquicos, gracias a los cuales sentimos que el tiempo va del pasado al futuro. La dirección de esta flecha de tiempo se determina porque recordamos el pasado pero no el futuro. Entonces, tenemos así tres tipos de fenómenos en la naturaleza que son asimétricos en el tiempo: el primero se refiere a los procesos termodinámicos, que suceden en la dirección de crecimiento del desorden; en segundo lugar tenemos al proceso de expansión del universo, que define la flecha cosmológica del tiempo; la tercera clase son los fenómenos psíquicos que dan la sensación de "caminar" del pasado al futuro y definen la flecha psicológica del tiempo. Pero lo más misterioso de toda esta complejidad es que las tres flechas apuntan hacia lo mismo.

Veamos que nos dice S. Hawking en su libro *Historia del tiempo*. Analicemos la primera de las flechas, para esto tomamos un modelo del cerebro como un ordenador que recuerda la información. Este dispositivo constará de una gran variedad de elementos que pueden encontrarse en dos estados. Imaginemos hilos horizontales en los que en cada uno está insertada una pequeña esfera que colocada en la izquierda representa al cero y en la derecha a la unidad. Con estas características se puede fijar cualquier información con base en el sistema binario. Esto es un dispositivo con memoria. Claro es que en los dispositivos reales como las computadoras y el cerebro técnicamente las cosas son mucho más complejas. Pero estamos describiendo lo fundamental del fenómeno.

Para fijar alguna información en nuestro modelo de cerebro arriba descrito debemos mover las esferas a la izquierda o derecha, según el tipo de información que tengamos. Para esto se requiere que gastemos energía, que al final se disipa en el espacio en for-

ma de calor y que, a su vez, acrecienta el caos (la entropía) del universo al calentar el medio ambiente. Entonces, al memorizar alguna información el desorden del universo sólo crece, aunque en algún lugar (en el dispositivo, en las cuentas, en la computadora o en el cerebro) se haya establecido algún orden. La secuencia del proceso en el que sucede la memorización coincide con la secuencia en la cual crece el caos en el universo. Nuestra sensación subjetiva de la dirección del tiempo se define en nuestro cerebro por la flecha termodinámica del tiempo. Lo mismo que una computadora, nosotros debemos recordar las cosas con la misma secuencia con la cual la entropía crece.

Hawking afirma que el caos crece con el tiempo porque medimos al tiempo en la dirección en la cual crece el caos. Para afinar esto, Hawking sostiene que: "Sea que Dios decidió que el universo debe de terminar su existencia en un estado con un gran orden y sin importar de qué estado comenzó su evolución. Esto significaría que el desorden disminuiría con el tiempo. Ustedes podrían ver que la taza destrozada se forma de los pedazos y que se eleva y llega a posarse sobre la mesa. Entonces cualquier ente humano que hubiese visto la taza con ese movimiento tan peculiar, estará viviendo en el universo en el cual el desorden decrece con el tiempo. Estos entes tendrían la flecha psicológica del tiempo orientado hacia atrás. Esto significa que ellos hubiesen recordado eventos del futuro (o sea lo que nosotros consideramos como futuro) y no hubiesen recordado eventos del pasado. En el momento que la taza está en el suelo ellos no recordarían que estuvo en la mesa, y cuando ella está en la mesa ellos recordarían que estuvo en el suelo."

Si en el inicio de todas las cosas hubiese gobernado el desorden, esto sería el estado de "muerte térmica del universo". En esta situación no exis-

tiría ninguna flecha termodinámica del tiempo, pero nuestro universo no es así. En el estado inicial deberían de aparecer otras propiedades, tales como propiedades cuánticas de la materia y del espacio-tiempo. ¿Cuál era la situación cuántica de nuestro universo en el momento inicial? Muchos de los especialistas —entre ellos Zeldovich y Hawking— se inclinan por la hipótesis de que debería de ser una situación de máximo orden.

Volvamos nuevamente al libro de Hawking. Las fórmulas matemáticas de la teoría se pueden escribir fácilmente al emplear el llamado *tiempo imaginario*, que es el tiempo común t que conocemos pero multiplicado por la unidad imaginaria (se denota como $it = \sqrt{-1} t$). En todas las ecuaciones donde se considera al tiempo imaginario, se denota como si fuese otra coordenada espacial más —recordemos que las coordenadas espaciales son tres (x, y, z) —; entonces, las propiedades de la dirección temporal it ahora no se diferencian en nada de las que tienen las otras tres coordenadas.

Ahora usaremos un globo terráqueo como modelo de evolución de nuestro universo. Los puntos del globo serán lo que los físicos llaman espacio-tiempo, de tal manera que el momento inicial de la vida del universo (el *Big Bang*) esté situado en el Polo Sur; dibujemos mentalmente las líneas de dirección del tiempo imaginario en las inmediaciones del momento inicial de vida del universo —que serán los meridianos que confluyen en el Polo Sur— mientras que las coordenadas espaciales serán entonces las paralelas. Debemos considerar que estamos modelando un universo muy sencillo, porque para el universo real debemos considerar tres coordenadas espaciales y aquí sólo tenemos una coordenada espacial y otra temporal. En términos generales esto no influirá en las descripciones cualitativas que obtendremos.

Al momento inicial, en nuestro caso al Polo Sur, lo denominan también

singularidad. Si el universo fuese cerrado y empieza a expandirse desde una singularidad, entonces tendremos el siguiente cuadro. La longitud de las paralelas define las dimensiones del universo cerrado, en tanto que la distancia desde el Polo Sur hasta los meridianos será el tiempo imaginario que transcurrió a partir del origen de la expansión. En el Polo Sur el universo comenzó con una dimensión cero y luego se expandió hasta llegar a su máximo en el Ecuador para después comenzar a comprimirse hacia el Polo Norte. Pero por ahora sólo nos abocaremos a la región cercana al Polo Sur.

Si nos encontramos en algún lugar cercano al Polo Sur sabremos dónde está la singularidad y, por tanto, dónde está el Polo Sur. Está al sur por supuesto, hacia donde está el pasado, el comienzo de la expansión, el origen de todo. Hacia el norte está el futuro, la siguiente expansión del universo. Si nos encontramos en el Polo Sur, ya no podemos ir más al sur, ni más hacia al pasado. Todos los caminos van solamente al norte, al futuro. Por esta razón la pregunta de qué hubo antes del *Big Bang* pierde sentido, pues el concepto de “antes” en este punto crucial no existe. Esto es lo mismo que preguntar qué hay más al sur del Polo Sur.

El inicio de la flecha cosmológica del tiempo es la singularidad, o sea, el *Big Bang*. Después de muchos millares de años desde la gran explosión aparecerían las galaxias formando la gran estructura dimensional de nuestro universo. Casi todo el orden inicial simétrico pasaría a convertirse en cada vez más desorden que definiría lo que ahora se denomina la flecha termodinámica del tiempo.

Después de aparecer los seres pensantes, luego de otros muchos millares de años, surge la flecha psicológica del tiempo dentro de la psiquis de estos seres. Como sabemos, esta fle-

cha coincide con la flecha termodinámica del tiempo. Todo esto en el entendido que la dirección de las flechas van del pasado al futuro.

En las vecindades del inicio del tiempo la dirección de la flecha cosmológica coincide con las dos direcciones anteriores. Pero posiblemente esto no será siempre así. Si la densidad de la materia en el universo supera cierto valor crítico, entonces en el futuro ocurrirá un momento en el que la expansión se deforme en compresión. En este punto la dirección cosmológica del tiempo cambiará y las otras dos flechas —la termodinámica y la psicológica— seguirán apuntando a lo mismo.

¿Por qué vivimos en una época en que las tres flechas del tiempo apuntan en la misma dirección? La respuesta parece estar relacionada con el principio antrópico. La vida racional en nuestro universo no pudo aparecer en todas las épocas de su evolución. Se puede considerar que nuestra civilización es muy joven, pues la vida no podía haber aparecido en un pasado lejano cuando no existían planetas ni estrellas y la temperatura era bastante elevada. Parece ser que las formas de vida que conocemos no pueden tampoco aparecer en un lejano futuro cuando se apaguen las estrellas o en general cuando se descomponga toda la materia en radiación. Si en el futuro el universo se comprime, todo será distinto. La vida en la forma que la conocemos podría sólo aparecer cuando exista algún planeta que se caliente por una estrella del tipo de nuestro Sol. Además, podemos considerar que la existencia de estos tipos de estrellas y de planetas es posible sólo en la etapa de expansión del universo, cuando todavía existen los combustibles nucleares en la materia. En resumen, podemos afirmar que una civilización como la nuestra existirá sólo en la etapa de “vida” del universo, cuando las tres flechas del tiempo apuntan en la misma dirección. 