

La flecha del tiempo

LUIS BRU*

S evidentemente para el hombre el tiempo es irreversible, lo que no ocurre con las leyes físicas, que ignoran el sentido del mismo. Los fenómenos astronómicos, por ejemplo, están regulados por leyes irreversibles e inmutables. Lo mismo les permite predecir un eclipse que pueda tener lugar, digamos en el año 2765, que suministrar con absoluta precisión a qué hora de qué día y de qué año tuvo lugar un eclipse total de Sol en la época de la esplendorosa Grecia o cuando reinaba en Egipto la dinastía XVIII. Lo dicho equivale a afirmar que las leyes de la Física son simétricas con respecto al tiempo y que los fenómenos son indiscernibles, tanto si se consideran "cara al futuro" como "cara al pasado". La Física no sabe distinguir entre un reloj normal y un "antirreloj", en el que las once, las diez, las nueve..., etc., estuvieran a continuación de las doce en vez de estarla la una, las dos..., etc. ¿Qué sucedería si de repente se invirtiera el sentido de giro de todos los planetas alrededor de sus respectivos ejes y también el sentido en el que recorren sus correspondientes órbitas alrededor del Sol? Si se admite que la gravitación universal es inmutable, lo que no es por completo evidente, todo equivaldría a revivir el pasado, no pareciendo entonces que las leyes por las que se rige la Astronomía tengan preferencia alguna por el sentido en el que los planetas efectúan sus movimientos.

La simetría con respecto al tiempo es aceptada por todas las leyes de la Física, desde las de Newton hasta las actuales, pero los sucesos de la vida ordinaria son asimétricos con respecto a él. La situación es absurda y paradójica, pues una inversión en el sentido del tiempo conduciría a que los viejos se convertirían en jóvenes; el futuro, en pasado, lo que significaría que la memoria se referiría a lo que está por suceder (*clarividentes?*), el fuego sería capaz de reconstruir una casa, y los trozos resultantes de la rotura de un jarrón se volverían a juntar. Lo cual no está de acuerdo con lo que sucede en la realidad. Todos tenemos conciencia del pasado, del presente y del futuro lo que equivale a aceptar, como un hecho incuestionable, que el tiempo fluye siempre en la misma dirección. Nadie duda al contemplar un álbum con fotografías familiares el orden en que fueron tomadas.

Pero la Física es implacable, nunca se considera satisfecha hasta que es capaz de explicar sin ambigüedad cada hecho que acontece. Se encuentra entonces ante el desafío de aclarar por qué el tiempo *avanza* siempre en la misma dirección, por

* Catedrático de la Universidad Complutense. Académico Numerario de la Real de Medicina.

qué existe una *flecha del tiempo*, una expresión que fue introducida por Eddington en una memorable conferencia dictada en Cambridge, en la que decía textualmente: "Dibujemos una flecha arbitrariamente, si al seguirla encontramos más y más elementos distribuidos al azar, la flecha apunta hacia el futuro, si sucede lo contrario, la flecha apunta hacia el pasado". Es la única distinción admitida por la Física; la flecha apunta hacia el desorden, en el sentido en el que una magnitud, cuya definición recordaré a continuación, la *entropía*, crece.

El tiempo es un ente muy difícil de definir. En primer lugar no hay un tiempo, sino "tiempos", el astronómico, el físico, el biológico..., etc. Se trata de una magnitud muy especial. Uno de los nortes de los físicos es medir y para hacerlo precisan utilizar unidades cuyos nombres y cuantías dependen del sistema de unidades que se emplee cada vez. De cada una de ellas existe un patrón internacional reproducible. Así ocurre, por ejemplo, con el metro, el kilogramo o el ohmio..., etc, que se conservan en estuches apropiados, pero no ocurre lo mismo con el *segundo*, que es la unidad de tiempo en todos los sistemas de unidades, al que no se concibe inmovilizado en el interior de una caja. No se puede "ver", "oír" o "gustar el tiempo" pero sí medirse. El tiempo sólo se puede definir como una sucesión de intervalos de duración arbitraria para los que el segundo, o el latido del corazón, en tiempos muy primitivos, podría servir de unidad. Los físicos manejamos intervalos de tiempo que abarcan una escala muy amplia, desde el *tiempo nuclear*, correspondiente a la desintegración de una partícula, llamada mesón psi, cuya duración es de una billonésima de billón de segundo, hasta la posible edad del Universo, cifrada en cien tollones de billones de segundos, pasando por el latido del corazón, próximo al segundo, o el de la rotación de la Tierra alrededor de su eje (un día), que es de cien mil segundos, o alrededor del Sol (un año), que es de diez millones de segundos.

Ahora bien, la definición del segundo no es precisa. Hasta época reciente se ha fundado en fenómenos astronómicos cuya aparente regularidad fueron utilizados por el hombre casi desde su aparición en la Tierra. Las teorías sobre la escala de tiempos, comenzadas por Halley en 1695 y perfeccionadas después por Newcombe, han llegado al límite de sus posibilidades y los fenómenos astronómicos no sirven para definir una unidad de tiempo que sea estable en el sentido requerido por la Física. A las dos escalas de tiempo utilizadas, el *tiempo universal* y el *tiempo de las efemérides*, ha habido que añadir el *tiempo de los relojes atómicos*, fundado en los fenómenos que tienen lugar en los átomos cuando, convenientemente excitados, pasan de un nivel a otro de energía. En 1967 se acordó elegir el átomo de cesio, y el reloj que lleva este nombre es de una precisión tal que su variación en treinta mil años no llega al segundo.

Un papel también importante lo juegan los fenómenos

LOS "TIEMPOS"

-adiactivos que suministran un método incomparable para medir la *ancianidad* de rocas, fósiles, minerales..., etc.; es decir, el intervalo de tiempo comprendido entre el estado del suceso y el momento presente.

¿Pero qué sucede con el tiempo medido por cualquier reloj que se mueve con gran velocidad o está sometido a la acción de un campo gravitatorio intensivo? Según las concepciones relativistas de Einstein, comprobadas con gran generalidad de forma experimental, los relojes se atrasan, tanto más cuanto más deprisa se mueven o más fuerte es el campo gravitatorio al que están sometidos. El tiempo transcurre de manera diferente para un observador situado en la Tierra que Dará otro que se aleja en un vehículo espacial con una velocidad grande (muy lejos de las alcanzadas por los vehículos que se utilizan en la exploración del espacio). Pero sucede que, de acuerdo con la teoría, el observador que se mueve puede pensar que es él el que está inmóvil y es la Tierra la que se aleja y que, por tanto, es para un observador situado en ella para el que el tiempo transcurre más despacio. Aquí reside la célebre paradoja de los hermanos mellizos, de los que uno viaja y otro se queda en el mismo momento de nacer y en otro cualquiera de su vida. Cada uno de los cuales, al regresar el primero al punto de partida, y en el supuesto de que conozcan la teoría de la Relatividad, piensa que ha envejecido más despacio que su hermano. También son irrefutables las pruebas del diferente comportamiento de los relojes situados en campos gravitatorios de distinta intensidad. Dos hermanas gemelas que trabajaran siempre unas en el sótano de la Torre de Madrid y otra en el último piso, tendrían al final de una vida de setenta años una diferencia de edad de algunas billonésimas de segundo. Como el campo de la gravedad terrestre es algo más débil en los polos que en el Ecuador, computando la edad asignada a nuestro planeta, el Ecuador es un día más joven que los polos. Medidas muy cuidadosas realizadas con partículas atómicas y la emisión de ciertas radiaciones han puesto de manifiesto que las concepciones teóricas de Einstein, no siempre aceptadas durante cierta época e incluso en el momento presente, parecen ser del todo correctas.

El tiempo se ha definido con muchas metáforas, pero ninguna es más vieja y persistente que la imagen del tiempo como un río. No se puede saltar dos veces el mismo río, afirmaba Heraclitus, con lo que expresaba la impermanencia natural de todas las cosas, porque el agua corre a su alrededor. Ni tan siquiera una vez, añade su discípulo Cratylus, porque "mientras saltas, tú y el río estáis cambiando de manera diferente".

La Física asocia la flecha del tiempo con la Termodinámica clásica tradicional, que asegura que la evolución de todos los procesos naturales discurren en una sola dirección; es decir, son *irreversibles*. Nunca se puede volver al punto de partida a menos que aportemos algo desde el exterior

(energía, por ejemplo). Un imán pierde poco a poco su propiedad de atraer partículas de hierro y de forma espontánea nunca vuelve a recuperarla. En la Termodinámica el tiempo juega un papel esencial. Actúa en una dirección única y determinada. El "ayer" ha pasado para siempre. Su famoso segundo principio puede enunciarse así: *La naturaleza ama el desorden que equivale a decir la uniformidad*. La irreversibilidad de un proceso, o sea, la dificultad que encuentra para volver a sus condiciones iniciales, puede medirse mediante una magnitud, cuyo concepto tanto trabajo nos costó adquirir de mano de D. Julio Palacios, durante nuestros tiempos de estudiantes, que recibe el nombre de *entropía* (del griego evolución, desorden) que viene a representar una medida del desorden. Su propiedad característica, y sorprendente a la vez, es que en los sistemas aislados, aquellos que no pueden ni ceder ni recibir nada del exterior, crece de manera incesante hasta alcanzar un valor máximo, que es cuando el sistema está en equilibrio con el exterior y es incapaz de seguir evolucionando. Es así como, tal vez, tendrá lugar la Muerte del Universo.

El estado final es también el de máximo desorden, ya que ahora han desaparecido las discontinuidades y las jerarquías que caracterizan el orden. ¡Piénsese en un ejército sin mandos o contémpiese el triste estado de nuestra Universidad! Por otro lado, toda evolución natural tiende hacia el estado más probable. Así, pues, la entropía ligada al desorden, debe estar también relacionada con la probabilidad de que un hecho suceda. El físico austriaco Ludwig Boltzman encontró la correspondiente relación matemática considerando el comportamiento de un gran número de partículas del que podía predecirse el más probable, por el incremento de la entropía. El trabajo, publicado en 1872, fue objeto de muchas críticas. La relación por él encontrada y su teorema, que liga la entropía S con la probabilidad W , no podía demostrar la existencia de la flecha del tiempo. Se piensa si estas críticas pudieron influir en el suicidio de Boltzman que tuvo lugar en 1906. Pero su ecuación famosa perdura. Sobre su tumba solo aparece la inscripción $S = k \log W$. La entropía utiliza sencillamente la probabilidad para predecir el futuro y no por una intrínseca flecha del tiempo en las ecuaciones de la Mecánica.

Los seres vivos son estructuras ordenadas por excelencia. Parece, entonces, que, a primera vista, contradicen el segundo principio de la Termodinámica. Pensemos, por ejemplo, en el comportamiento de la memoria humana, cuyo mecanismo tan mal conocemos. Lo que sí parece claro es que el recordar supone el paso de un estado desordenado a otro en el que impera un orden mucho mayor. Ahora bien, tal paso exige un consumo de energía que se disipa en forma de calor, lo que supone aumentar la entropía del Universo, pero se puede demostrar que el incremento en el desorden total, que el proceso lleva consigo, es superior al que supone el acto de

ENTROPÍA Y DESORDEN

recordar. Utilizando un computador de manera apropiada se puede comprobar que la dirección en la que el computador "recuerda el pasado" es la misma en la que crece el desorden. Vamos a insistir un poco más sobre lo anterior. Hace unos pocos años ha surgido la figura del físico Ilya Prigogine, nacido en Moscú, cuya familia, con motivo de la revolución, emigró a Lituania primero, a Berlín después, para acabar en Bélgica. En la actualidad es profesor de la Universidad de Bruselas, pero permanece tres meses cada año en la de Texas, en Austin. Para este científico, premio Nobel de Química en 1977, *el tiempo es una dimensión olvidada* y hay que fijar la atención en los procesos irreversibles, lo que obliga a reconsiderar la dirección tradicional de la flecha del tiempo. Prigogine introduce el concepto de las *estructuras disipativas* que describen *los sistemas abiertos*; es decir, sistemas que forzosamente mantienen un intercambio incesante de materia y energía con el mundo exterior tal y como sucede con los seres vivos. Para él, un verdadero sistema cerrado es un concepto tan ideal como puede ser el móvil perpetuo. Como muy bien señala, las cosas transcurren de manera muy diferente en el mundo inanimado y en el biológico. Los cristales son un ejemplo típico de una estructura ordenada capaz de perdurar sin necesidad de tomar nada de fuera. Son **estructuras en equilibrio**, que no tienen nada que ver con la de los seres vivos. La diferencia entre el esclavo que esculpió Miguel Ángel y el que le sirvió de modelo radica en que el primero, para perpetuar su forma, no necesita intercambiar nada con el exterior, lo que no sucede con el segundo que, para conservar su orden funcional y su arquitectura, precisaba que se produjeran una serie de reacciones primarias que dependen del mundo exterior.

El máximo interés radica, según la Física clásica, en los sistemas en equilibrio, en los que han cesado, tanto las reacciones químicas como la conducción del calor. Es esta la idea contra la que arguye Prigogine. *Los estados que no están en equilibrio son los de mayor interés e importancia*. Es la falta de equilibrio lo que es esencial para comprender nuestro mundo y nuestro Universo. Los procesos irreversibles pueden jugar un papel constructivo más que uno destructivo. Son los que conducen a las **estructuras disipativas**.

Pese a todo, se considera que son siete las razones fundamentales que la Física puede aducir en favor de la irreversibilidad del tiempo, aparte de la muy convincente aportada por la Termodinámica, vamos a citar otras dos.

El comportamiento de las partículas elementales corrobora la irreversibilidad del tiempo. Experimentos muy cuidadosos llevados a cabo con los kaones neutros, una de las partículas más pequeñas y de vida más corta, indican que si se invirtiera el sentido de la flecha del tiempo, tales partículas se desintegrarían de manera diferente, lo que supone una prueba más en favor de la dirección preferida por el tiempo.

En el aspecto cosmogónico, la presencia en el Universo de

IRREVERSABILIDAD DEL TIEMPO

los *agujeros negros*, ya previstos por la teoría de la Relatividad, parecen aportar una confirmación de lo que venimos exponiendo. Se trata de entes de dimensiones pequeñas, pero en los que la acción gravitatoria es tan intensa que atrapan cuanto está a su alrededor, incluyendo, incluso, todo tipo de radiaciones y por tanto la luz. Nada de lo que "devoran" puede salir de ellos. Parece, entonces, claro que una inversión del sentido del tiempo debería conducir a la existencia de "los agujeros blancos" o fuentes blancas, como también se les ha llamado, que estarían "vomitando" continuamente materia y luz de la misma manera a como los negros las absorben. Si la Naturaleza no fuera capaz de distinguir entre el antes y el después, deberían existir tantos agujeros blancos como negros, pero la realidad es que aquéllos jamás han sido localizados. Bien entendido que los agujeros negros nunca han sido observados, y su presencia se ha detectado de manera indirecta, pero fiable en extremo, y todo parece indicar que los blancos lo serían de manera parecida.

Es una hipótesis bien admitida que, a partir del *instante cero*, del **big-bang**, el Universo está en continua expansión y las galaxias se alejan unas de otras a velocidades que se aproximan a la de la luz. Pero también aducen científicos de primera talla que, en un futuro lejano, el Universo podrá empezar a contraerse e incluso que pueda ser pulsante como un balón de goma que se inflase y desinflase. ¿Supone esto que el tiempo podrá invertirse? Todo parece indicar que no> y la mayoría de los físicos piensan que incluso un colapso del Universo no llevaría consigo alterar la dirección de la flecha del tiempo.

Parece, entonces, que la idea que la Física gusta, **que el tiempo corre de acuerdo con los principios inmutables de la Termodinámica**, está, además, avalada por consideraciones cosmogónicas. Queda el escollo de la importancia que le da Prigogine a los estados termodinámicos que no están en equilibrio. El problema está en íntima conexión con la idea de la interpretación estadística de la entropía. La dirección del tiempo es de una importancia capital. Una pieza de música, dice Prigogine, que, además, es un buen pianista, "tocada hacia atrás" es una pieza de música diferente.

Todo lo anterior parece estar en estrecha conexión con el comportamiento del "caos". El estudio de los sistemas caóticos acapara la atención en el momento actual de no pocos físicos y matemáticos que están considerando la existencia de un orden dentro del caos y que los meteorólogos siguen muy de cerca por la importancia creciente que tiene la previsión del tiempo meteorológico. Piénsese que un sistema caótico formado sólo por tres partículas puede comportarse de manera tan complicada que resulta impredecible. Tomio Petrosky, en Texas, ha desarrollado un modelo de computador para poner de manifiesto tal comportamiento caótico. No podemos aquí, ni es norte de esta aportación, entrar en detalle. Sólo indicaremos que ha considerado un sistema que

EL COMPORTAMIENTO DEL "CAOS"

parece tan sencillo como es el planeta Júpiter en órbita alrededor del Sol y un cometa lanzado desde una gran distancia.

"En algunos sistemas dinámicos, —asegura Prigogine—, no tiene sentido hablar de las trayectorias newtonianas. Son una idealización que no existen en el mundo real. Estamos viviendo un momento muy interesante. No puede seguir hablándose de que la irreversibilidad es una aproximación o falta de conocimiento".

Los físicos que discrepan de las ideas de Prigogine dejan ver, en sus discusiones, que las palabras Cosmogonía y Termodinámica no pertenecen a lenguajes diferentes, y no deja de ser curioso, afirma Davies, de la Universidad de Newcastle, "que todos los aspectos de la dirección del tiempo se refieren a la creación o al final del Universo".

Hemos tratado de exponer algunas de las aportaciones de la Física a la explicación de la flecha del tiempo, a que el tiempo parece correr en un solo sentido. Pueden hacerse algunas más, como la propagación de las radiaciones electromagnéticas, por ejemplo, pero consideramos que con lo anterior es suficiente. Los termodinámicos y los cosmólogos no parecen estar en total acuerdo, pero los científicos jamás perderemos la esperanza y confiamos en que en un plazo próximo o lejano el enigma del tiempo se aclarará. Aun cuando pueda parecer paradójico en este siglo del frenesí, no hay prisa aun cuando se trate del correr del tiempo.

LA QUINTA FUERZA

La posible existencia de una quinta fuerza, aceptada por muchos, que habría que añadir a las cuatro presentes en la Naturaleza, está conduciendo a un joven físico de la Universidad de Purdue, Ephraim Fischbach, a reconsiderar, tanto el comportamiento de los kaones como si el Universo seguirá expandiéndose y enfriándose por siempre o llegará un día en que volverá por sus pasos para retornar al estado inicial del big-bang. Un trabajo suyo, recientemente aparecido en la revista más respetada, *Physical Review Letters*, ha constituido una auténtica sorpresa. Alega que la situación a este respecto en el momento actual puede compararse a la que se encontraba el Electromagnetismo a mediados del pasado siglo. No se olvide que es la base de toda la tecnología moderna. Los cohetes, las comunicaciones y el láser, un tanto por ciento muy elevado de los avances de la Medicina..., etc, eran imposibles de predecir hace tan sólo cien años. Es muy pronto para barruntar lo que la nueva fuerza puede traer, pero si puede controlarse podrá ser utilizada.

Fischbach está en contacto permanente con todos los que de forma experimental trabajan sobre ello y dice, con cierto humor, que cada día espera una llamada telefónica que le comunique que Galileo estaba equivocado y que la quinta fuerza, también relacionada con el sentido de la flecha del tiempo, es una realidad.