

## [EL TIEMPO EN LA FÍSICA (\*)]

**Igor Saavedra**

Profesor Titular,  
Departamento de Física,  
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas,  
Universidad de Chile.

### EL TIEMPO ABSOLUTO DE NEWTON

Time present and time past  
Are both perhaps present in time future,  
And time future contained in time past.  
T.S. ELIOT (*Four Quartets*).

La Mecánica es la rama de la Física que históricamente da comienzo a ésta (y a la ciencia natural en general), en el sentido en el que la entendemos hoy. Aunque por cierto un rasgo distintivo de la ciencia es su carácter acumulativo, y por lo tanto hay siempre algún grado de inexactitud en el asociar el nacimiento de una teoría a la obra de un solo hombre, parece adecuado no obstante el fijar como punto de partida de la Mecánica en el sentido contemporáneo aludido, la fecha de aparición del gran libro de Newton, *Principios matemáticos de la filosofía natural*, publicado en 1686.

El propósito de la Mecánica es relacionar sucesos que ocurren en un punto o puntos determinados del espacio y en un tiempo o tiempos también especificados (por ejemplo, aquí y ahora) con sucesos que ocurren en otros lugares y en otros tiempos. Es de toda evidencia, por lo tanto, que no es posible construir una teoría semejante a menos que se comience por especificar muy claramente qué se entiende por tiempo y qué por espacio.

Sin duda así lo advierte Newton, quien sin embargo abre en su texto la discusión de estos problemas con la siguiente declaración: *No defino el tiempo, el espacio, el lugar ni el movimiento debido a que son de todos bien conocidos.*

¿Cuán bien conocidos? Es pertinente al respecto escuchar a San Agustín (*Confesiones*): *Porque, ¿qué es el tiempo? ¿Quién puede explicarlo fácil y brevemente? ¿Quién puede entenderlo siquiera en el pensamiento, de modo de poder decir una palabra acerca de él? Y sin embargo, ¿no es cierto que en nuestra conversación no hay nada a que nos refiramos con mayor familiaridad o conocimiento que al tiempo? Y por cierto que lo entendemos cuando hablamos de él, y lo entendemos también cuando oímos a otro hablar de él. ¿Qué es, entonces, el tiempo? Si nadie me pregunta, sé lo que es. Si deseo explicarlo al que me lo pregunta, no lo sé. Y sin embargo digo con confianza que sé que si nada cambiara de un estado a otro, el tiempo pasado no existiría: y que si nada estuviera aún por*

*ocurrir, no habría tiempo futuro; y que si no existiera nada en absoluto, no habría tiempo presente (\*)*.

Consciente de esta situación, Newton estima necesario observar que la *gente común* concibe el tiempo sólo a través de su relación con *los objetos sensibles*, que ése es por tanto un tiempo relativo (que llama también aparente y común), al que define diciendo: *es alguna cantidad de duración sensible y externa (exacta o inexacta), medida mediante el movimiento y que se usa comúnmente en lugar del tiempo verdadero; por ejemplo una hora, un día, un mes, un año.*

Lo que precisamos en nuestra vida diaria, en cuanto a los fenómenos físicos se refiere, no es propiamente la noción del tiempo, sino más bien la de *intervalo de tiempo*, esto es, el tiempo que transcurre entre dos sucesos. Así por ejemplo, un día es el intervalo de tiempo transcurrido entre dos salidas del sol consecutivas, y un segundo el intervalo entre dos posiciones idénticas (consecutivas) de un péndulo. En ambos casos hay un movimiento asociado; la rotación de la Tierra en el primero, la oscilación de un cuerpo en el segundo. Es aparente que la medición de intervalos de tiempo sólo es posible a partir de fenómenos de carácter cíclico, que con regularidad se repiten a sí mismos.

Es también *manifiesto* que es a partir de la observación de estos fenómenos periódicos - la noche sucede al día y el día a la noche y así, en apariencia, *ad infinitum* - que los hombres hemos desarrollado, mediante un proceso de abstracción, la idea del tiempo que transcurre de manera inexorable e independiente de nosotros; el presente se transforma en pasado y el futuro en presente, en una sucesión continua y uniforme sin comienzo ni fin. Este es el tiempo que Newton llama absoluto, *verdadero* y *matemático*, y que define como tal que *por sí mismo, y por su propia naturaleza, fluye uniformemente sin relación a nada externo.*

El tiempo absoluto puede representarse entonces como el movimiento de un punto sobre una línea recta, viniendo desde el infinito y yéndose al infinito con un desplazamiento uniforme. No existe un origen, en consecuencia, para el tiempo absoluto, ni tampoco un instante de término. ¿Puede abstraerse esta idea acerca del tiempo a partir de los conocimientos de la Física actual?

La respuesta es negativa. Considérese, para comenzar, la sucesión día-noche recién mencionada, que está asociada al movimiento de rotación de la Tierra y en consecuencia a su existencia misma. La idea de este proceso repitiéndose indefinidamente es entonces la idea de que la duración de la Tierra como planeta es infinita; la Tierra, y el sistema solar, son eternos. Sin embargo, no es eso lo que sabe la Física contemporánea, de acuerdo a la cual durante los últimos 4.500 millones de años se ha consumido aproximadamente la mitad del hidrógeno del Sol - mediante el proceso de fusión nuclear, con la consiguiente radiación de energía (que permite la vida sobre nuestro planeta) - y al cabo de otros 5.000 millones de años este combustible se habrá agotado, como consecuencia de lo

cual aumentará el volumen del Sol y su radio abarcará sucesivamente las órbitas de los planetas, incluida la Tierra, que encontrará así su final. La sucesión día-noche no es por tanto infinita, sino que tiene fin. El concepto de tiempo que directamente puede inferirse de ella no corresponde entonces al tiempo absoluto. Puede argumentarse, por cierto, que el tiempo que en definitiva interesa no es el asociado a la duración de la Tierra o del sistema solar, aunque a partir de lo implícitamente supuesto para aquella se hubiera generado inicialmente el concepto de tiempo que nos preocupa; que lo que es realmente pertinente a estas consideraciones es el tiempo asociado a la duración del Universo. En lo esencial, sin embargo (en relación con el problema en estudio), la situación en este caso es la misma que en el recién discutido: el Universo nació hace aproximadamente 10.000 millones de años, en una gran explosión (*Big Bang*), y ha estado desde entonces en un proceso de expansión, en el que se encuentra actualmente, y que ha de continuar por aproximadamente otros 50.000 millones de años. Entonces si la cantidad de materia en el Universo es suficiente para ello (ésta es una cuestión abierta en la Física de hoy y en la cual se investiga activamente; por ejemplo, un experimento actualmente en marcha en el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN) podría dar una respuesta afirmativa a este problema dentro de los próximos meses), la expansión terminará y el Universo comenzará a contraerse y volverá a su situación original - a su *instante cero* - en otros 60.000 millones de años. La duración del Universo resulta entonces finita en este caso; hay un instante inicial y hay un instante final. Todavía más, ella depende del contenido de masa del Universo, que es por cierto algo *externo* al concepto de tiempo. Por lo tanto la Física tampoco justifica aquí la idea de ese *tiempo absoluto* que *fluye uniformemente sin relación a nada externo*, sino que, por el contrario, pone más bien de manifiesto el carácter metafísico de este concepto. Newton, desde luego, entendía bien que toda la idea especulativa, desprovista de una base experimental, es ajena al marco conceptual de la Física. Así lo afirma de modo categórico en el escolio final de los *Principia*: *todo aquello que no se deduce de hechos experimentales debe llamarse una hipótesis (\*)*, y las hipótesis, ya sean metafísicas o físicas, ya se refieran a propiedades misteriosas o mecánicas, no tienen cabida en la filosofía experimental.

Para Newton, en consecuencia, es clara la necesidad de demostrar experimentalmente la existencia del tiempo absoluto. Con este propósito, y como ha definido también un *espacio absoluto* (como tal que *por su propia naturaleza, sin relación a nada externo, permanece siempre igual e inmóvil*) y un *movimiento absoluto* (como la traslación de un cuerpo de una parte a otra del espacio absoluto), se concentra en este último, puesto que su existencia implica la de los dos primeros.

Afirma Newton: *Los efectos que distinguen el movimiento absoluto del relativo son las fuerzas de retroceso respecto del eje de un movimiento circular. Pues no hay tales fuerzas en un movimiento circular puramente relativo, en tanto que en un movimiento circular verdadero y absoluto ellas son mayores o menores dependiendo de la cantidad del movimiento.* Y procede de inmediato a describir un

experimento al respecto hecho por él mismo: *Si un recipiente que pende de una larga cuerda se hace girar tanto que la cuerda queda muy retorcida, y luego se le llena con agua y se le mantiene en reposo, y a continuación, por la acción repentina de otra fuerza, se le hace girar en la dirección contraria, mientras la cuerda se destuerce continuará por algún tiempo en este movimiento. La superficie del agua será plana al principio, tal como antes de que el recipiente empezara a moverse; pero a continuación el recipiente, al comunicarle gradualmente su movimiento al agua, la hará empezar a girar y alejarse poco a poco del centro, y subir por las paredes del recipiente formando una figura cóncava (como yo mismo lo he comprobado), y mientras más rápido sea el movimiento tanto más subirá el agua, hasta que por último, realizando sus revoluciones en los mismos tiempos que el recipiente, llegará a un estado de reposo relativo con él. Este ascenso del agua muestra su esfuerzo por alejarse del eje de su movimiento; y el movimiento circular verdadero y absoluto del agua, que es aquí directamente contrario al relativo, se hace aparente y puede medirse por este esfuerzo. Al principio, cuando el movimiento relativo del agua respecto del recipiente era máximo, no producía esfuerzo alguno por alejarse del eje; el agua no mostraba tendencia alguna a irse hacia la periferia ni a subir por las paredes, sino que retenía su superficie plana; y por lo tanto el movimiento circular verdadero no había comenzado todavía. Pero después, cuando el movimiento relativo del agua había decrecido, su ascenso por las paredes del recipiente probaba su esfuerzo por alejarse del eje; y este esfuerzo mostraba que el movimiento circular real del agua crecía continuamente, hasta alcanzar su valor máximo cuando el agua llegó al reposo relativo con el recipiente.*

¿Qué demuestra este experimento? Como lo ha señalado Mach (1883) lo que en verdad demuestra es que la rotación relativa del agua respecto de las paredes del vaso no produce fuerzas centrífugas, en tanto que su rotación (junto con el vaso) relativa a la Tierra, y en definitiva, a las estrellas fijas, sí las produce. Para poder afirmar que se trata aquí de un movimiento absoluto sería necesario fijar el vaso con agua y hacer rotar en cambio la esfera de las estrellas fijas, para probar que en esas condiciones no hay fuerzas centrífugas, y por cierto ello es imposible. La conclusión que emerge de consideraciones como las anteriores es que el tiempo absoluto no es una cantidad medible en Física; todavía más, como parece claro al propio Newton, no es siquiera una cantidad conceptualmente necesaria para el desarrollo de esta ciencia. ¿A qué obedece, entonces, esta insistencia en ella?

Una explicación posible la proporciona el siguiente párrafo del *Escolio general*. Refiriéndose a Dios, dice Newton:

*Él es eterno e infinito, omnipotente y omnisciente; esto es, su duración se extiende desde la eternidad a la eternidad y su presencia del infinito al infinito... No es la eternidad ni el infinito, sino que es eterno e infinito; no es la duración ni el espacio, pero perdura y está presente. Perdura por siempre, y está presente en todas partes; y, por el hecho de existir siempre y en todas partes, Él constituye la*

*duración y el espacio.*

Para Newton, entonces, el tiempo y el espacio absolutos en definitiva se confunden con Dios.

## EL TIEMPO RELATIVO DE EINSTEIN

En el año 1905, en un trabajo publicado en la revista *Annalen der Physik* con el título de *Acerca de la Electrodinámica de los cuerpos en movimiento*, Einstein vuelve a examinar los supuestos iniciales de la Mecánica y, en particular, recuerda que su propósito es el de relacionar sucesos que ocurren en diferentes puntos del espacio y en tiempos también diferentes: *Si deseamos describir el movimiento de un punto material, damos los valores de sus coordenadas como funciones del tiempo. Pero de inmediato formula la siguiente advertencia: Ahora bien, debemos tener muy presente el hecho que una descripción matemática de este tipo carece de significado físico a menos que tengamos muy claro lo que entendemos por tiempo.*

¿Qué llevó a Einstein a replantearse este problema? A partir de los trabajos de J.C. Maxwell, en la segunda mitad del siglo XIX, empezó a ser aparente una profunda contradicción entre las leyes de la Electrodinámica y las de la Mecánica Newtoniana, contradicción que queda bien simbolizada por el resultado negativo del célebre experimento de Michelson y Morley (1887): la propagación de ondas electromagnéticas - por ejemplo, la luz - que, como es bien sabido, es una predicción de la teoría de Maxwell ampliamente validada por la evidencia experimental, sólo puede entenderse en el marco de la física Newtoniana si se acepta la existencia de un medio material que sirva de soporte a esas ondas, del mismo modo que la existencia del aire permite la propagación de las ondas de sonido. Este medio material fue llamado éter y su no existencia quedó demostrada por el resultado negativo del experimento de Michelson y Morley. La contradicción aludida permaneció sin resolverse hasta 1905, el año en que Einstein demostró que las propiedades de propagación de las ondas luminosas - las características singulares del movimiento de la luz - requieren de una modificación profunda de la teoría de Newton, la que en definitiva va a aparecer como una excelente aproximación a la descripción de los movimientos que ocurren en la naturaleza, pero sólo en el caso en que las velocidades envueltas son mucho menores que la velocidad de la luz en el espacio vacío, que es de 300.000 km/seg.

La nueva teoría, que la generaliza y que la contiene, es la Teoría de la Relatividad Especial, cuyo punto de partida es la siguiente observación de Einstein: *Tenemos que tomar en cuenta el hecho que todas nuestras proposiciones en las cuales desempeña algún papel el tiempo son siempre proposiciones que se refieren a sucesos simultáneos.* En otras palabras, lo que afirma Einstein es que todas nuestras descripciones de sucesos (datos experimentales) en las que aparece la noción de tiempo en realidad siempre se refieren a sucesos que ocurren en forma simultánea; que en lo que a la Física concierne, en consecuencia, el tiempo y la

simultaneidad deben considerarse como conceptos equivalentes.

Siguiendo a Einstein analicemos ahora el significado de la siguiente proposición: *El tren llega aquí a las siete*. Lo que realmente queremos decir con esta frase es: *El tren llega aquí cuando las manecillas de mi reloj marcan las 7*, o, en otras palabras, *la llegada del tren y la posición de las manecillas de mi reloj marcando las 7 son sucesos simultáneos*. La primera frase resulta así ser sólo una abreviación de la última - hablamos de tiempo, pero en verdad lo que implicamos es simultaneidad.

Ahora bien, es claro que no hay dificultad en definir la simultaneidad de dos sucesos cuando éstos (esencialmente) coinciden en su posición espacial, como ocurre en el ejemplo anterior. El problema no es igualmente simple cuando se quiere hablar de simultaneidad de sucesos separados espacialmente.

En efecto, supongamos que en dos puntos del espacio (A y B), hay observadores provistos de relojes. Es claro que cada uno de ellos puede relacionar (en su dependencia temporal) los sucesos que ocurren en la vecindad de A y los que ocurren en la vecindad de B, respectivamente. En este sentido es correcto hablar, para cada caso, de un *tiempo de A* y de un *tiempo de B*. ¿Qué ocurre cuando tratamos de comparar, en cuanto a su relación en el tiempo, un suceso que ocurre en A con un suceso que ocurre en B?

Einstein afirma que tal comparación no es posible a menos que se introduzca un supuesto adicional: *No hemos definido un tiempo común para A y B, porque es imposible definirlo a menos que establezcamos por definición que el tiempo necesario para que la luz viaje desde A a B es igual al tiempo que se necesita para viajar desde B a A. Evidentemente, a partir de esta definición es posible sincronizar los relojes en A y B y por lo tanto dar significado a la comparación de sus lecturas y de los sucesos respectivamente simultáneos con ellas en ambos puntos*.

Una definición de sincronización equivalente pero más intuitiva es la siguiente: decimos que los relojes en A y B están sincronizados si los observadores correspondientes los han puesto en marcha en el momento de recibir una señal luminosa que ha sido encendida en el punto medio de la recta que une los puntos A y B.

Obsérvese el papel central que juega la luz en estas definiciones y por lo tanto en la teoría que emerge de ella. Su propiedad más importante, que Einstein eleva a la categoría de postulado (uno de los dos sobre los cuales construye la teoría), es que su velocidad es independiente del movimiento relativo de la fuente respecto del observador. Este es un hecho experimental, que toda la evidencia acumulada hasta hoy ha demostrado rigurosamente válido.

¿Qué debemos entonces entender por "tiempo", como consecuencia de estas

consideraciones? Dice Einstein: *El tiempo de un suceso es el dado simultáneamente con el suceso por un reloj estacionario ubicado en el lugar del suceso; este reloj debe estar sincronizado con un reloj estacionario especificado.* ¡El tiempo es, ni más ni menos, lo que mide un reloj!

Apliquemos ahora estas ideas al análisis del siguiente problema: supongamos un tren en cuyos extremos anterior y posterior viajan dos observadores, que llamaremos A y B, respectivamente. En el punto medio del tren, es decir a igual distancia de A y B, viaja un tercer observador, que llamaremos O. El tren se mueve con velocidad constante y en el periodo de tiempo que nos interesa está pasando (sin detenerse) frente a una estación, en cuyo andén hay otro observador, que llamaremos O' que está inmóvil - es decir, su velocidad respecto del andén es nula - observando el paso del tren. Los observadores A y B están provistos de aparatos idénticos que les permiten producir señales luminosas. En el momento en que el observador O pasa justo frente al observador O' llegan a ambos señales luminosas producidas por A y B. ¿Qué pueden concluir, a partir de este hecho, los observadores O y O' acerca de los tiempos de emisión de las señales en A y B?

El observador O razona: *He recibido simultáneamente las señales luminosas. Por otra parte, sé que A y B están ubicados a igual distancia de mí. Como la velocidad de las señales es la misma (la velocidad de la luz) en ambos casos, concluyo que A y B emitieron sus señales simultáneamente.*

El observador O' razona: *He recibido las dos señales simultáneamente, y simultáneamente también con el paso del observador O frente a mí; es decir, cuando el punto medio del tren pasaba frente a mí. Por lo tanto, como la velocidad de la luz es finita (es muy grande, pero no infinita), las señales tienen que haber sido emitidas cuando el punto A estaba más cerca de mí que el punto B. Por otra parte, la velocidad de la luz es la misma en ambos casos. En consecuencia, concluyo que el observador B encendió su señal antes que el observador A.*

En otras palabras, dos sucesos que son simultáneos para un observador (observador O) no son simultáneos para otro (observador O'), en movimiento respecto del primero (si y es la velocidad del tren, para el observador O el observador O' se mueve con velocidad  $-v$  respecto de él). Por lo tanto, simultaneidad no es un concepto absoluto, sino relativo al estado de movimiento del observador. En consecuencia, ya que el tiempo y simultaneidad son conceptos equivalentes, lo que debemos concluir es que el tiempo no es absoluto, sino que depende del movimiento relativo. En nuestro ejemplo, *el tiempo del tren no es el mismo que el tiempo del andén.* El tiempo es relativo.

La teoría de Einstein hace cuantitativa esta conclusión. Supongamos un reloj que se mueve en una línea recta respecto de un conjunto de relojes estacionarios idéntico y sincronizado entre sí. La teoría demuestra que todo intervalo de tiempo medido en el reloj en movimiento es siempre *menor* que el intervalo de tiempo

correspondiente medido en los relojes estacionarios. Este fenómeno se conoce con el nombre de *dilatación del tiempo* y constituye un hecho ampliamente demostrado por los resultados experimentales de la Física de este siglo.

Es importante insistir sobre el sentido preciso de esta proposición, que es el que justamente da su nombre a este fenómeno: son los observadores en reposo respecto del conjunto de relojes estacionarios los que miden un intervalo de tiempo siempre mayor que el intervalo de tiempo correspondiente medido por el reloj en movimiento. De ahí el nombre de *dilatación del tiempo*.

Si la velocidad del reloj en movimiento fuera aproximadamente igual, aunque siempre menor, que la velocidad de la luz en el espacio vacío, entonces el intervalo de tiempo correspondiente medido en los relojes estacionarios crecería casi indefinidamente. Obsérvese aquí con atención el hecho que la velocidad de la luz (en el espacio vacío) emerge en la teoría de la Relatividad Especial como una *velocidad límite* en la naturaleza. Este punto se discutirá a continuación, en relación con el concepto de causalidad.

La relatividad del tiempo y el carácter absoluto de la velocidad de la luz hacen que también el espacio tenga un significado relativo y no absoluto: las dimensiones longitudinales se acortan debido al movimiento.

Finalmente, en la teoría de Einstein ya no es posible separar trivialmente el tiempo y el espacio, como ocurre en el caso de la teoría de Newton sino que ambos se mezclan de manera inextricable, como fuera líricamente anunciado por Minkowski en un célebre discurso pronunciado en 1908: *De ahora en adelante el espacio por sí mismo y el tiempo por sí mismo están condenados a desvanecerse en meras sombras y sólo una especie de unión de ambos preservará una realidad independiente*. Este espacio-tiempo proporciona el marco adecuado para el estudio del Universo.

## CAUSALIDAD Y SECUENCIA TEMPORAL

Se acaba de señalar que una de las consecuencias de la Relatividad Especial es el hecho que la velocidad de la luz (en el espacio vacío) aparece como una velocidad límite en la naturaleza. Esta consecuencia de la teoría ha sido ampliamente confirmada por la correspondiente evidencia experimental y constituye hoy un hecho físico bien establecido.

Las velocidades posibles en la naturaleza, esto es, las velocidades a las que se pueden mover los objetos físicos, varían desde cero (objeto en reposo) hasta la velocidad de la luz. Un objeto físico de masa no nula puede ser acelerado desde el reposo hasta alcanzar una velocidad tan próxima a la luz como se quiera, pero siempre menor que ella; con la velocidad de la luz sólo pueden moverse los objetos de masa nula, como es el caso de la luz, precisamente. Ningún objeto perteneciente a una u otra de estas dos categorías puede ser llevado a

velocidades superiores a la de la luz y es en este sentido que ella aparece como una velocidad límite en la naturaleza.

No obstante, nada hay en la teoría que impida la existencia de objetos físicos que se muevan *siempre* con velocidad mayor que la de la luz. Tales objetos podrían tener velocidades mínimas tan próximas a la de la luz como se quisiera, aunque siempre mayores que ella, y podrían acelerarse a partir de allí hasta alcanzar una velocidad infinita. Estos objetos (partículas), que hasta hoy no han sido encontrados en la naturaleza a pesar de la intensa búsqueda experimental de que han sido objeto, han recibido el nombre de *taquiones* (del griego *tachys*, que significa veloz).

Ahora bien, el hecho que la velocidad de la luz sea la máxima posible (que es lo que experimentalmente sabemos hoy) establece una estricta secuencia temporal asociada a la idea de *causalidad*: la causa siempre debe anteceder al efecto. Esto ocurre porque la necesaria información de la primera al segundo puede a lo sumo propagarse con una velocidad igual a la de la luz, pero no mayor que ella, y en consecuencia se demora siempre un tiempo no nulo en hacerlo, esto es, necesariamente se recibe después y no antes de ser emitida, ni en forma simultánea con la emisión. La teoría de la Relatividad da un significado preciso, entonces, a la idea más intuitiva de causalidad.

Esta idea tiene el rango de un principio básico en las teorías físicas aceptadas hoy, y sin embargo no aparece como necesaria en el sentido que es posible construir descripciones satisfactorias de la naturaleza - tan satisfactorias como las bien aceptadas - sin hacer uso de ella. Tal caso, por ejemplo, de la teoría llamada de *Acción a la distancia*, que no es causal pero que da cuenta de los fenómenos electromagnéticos en forma tan satisfactoria como la *Teoría de campos* usual, que sí lo es. La diferencia principal entre ambas es que en la primera el instante de tiempo llamado *presente* pierde el papel privilegiado que se le asigna en la segunda y se le reduce a una posición en la teoría equivalente a las del tiempo *pasado* y del tiempo *futuro*: los hechos físicos que ocurren en un instante dado dependen tanto de los valores de las variables físicas en ese instante como de sus valores en tiempos anteriores y posteriores a él. En otras palabras, en este tipo de teoría no es posible separar los fenómenos observados en causas y efectos, esto es, no es posible describirlos en términos de una variable *tiempo* siempre creciente.

Por otra parte, es fácil demostrar que la secuencia temporal causa-efecto, esto es, el hecho que el efecto sea posterior a la causa (que ocurra después de ella) no es una consecuencia necesaria del concepto de causalidad. En efecto, cuando se dice que un hecho físico A es causa de otro hecho físico B (efecto), lo que se quiere decir es que, si en un instante arbitrario de tiempo,  $t_{A1}$ , producimos A, entonces en el tiempo  $t_{A1} + T$  aparecerá B, y que si repetimos la operación A al instante también arbitrario  $t_2$ , B volverá a ocurrir al tiempo  $t_{A2} + T$ , y así sucesivamente, para cualquier tiempo  $t_A$ . Cuando esta correlación ocurre un

número grande de veces, se concluye que A es la causa del efecto B. Obsérvese sin embargo que en ninguna parte se ha estipulado que el intervalo de tiempo T deba ser una cantidad positiva, esto es, que podría tratarse de una cantidad negativa y en consecuencia B *anteceder* a A y que de todas maneras A sería la causa de B. La secuencia temporal asociada a la noción de causalidad sería en este caso *efecto-causa*, en lugar de *causa-efecto*, pero de todas maneras se mantendría la idea de que la causalidad conlleva una ordenación temporal.

Obsérvese además que en esta discusión se ha supuesto implícitamente que el efecto no tiene influencia alguna sobre la causa que lo produce. En el caso recién considerado, esto se traduce en el hecho que los tiempos  $t_A$  ( $t_{A1}, t_{A2}, \dots$ ) pueden ser elegidos en forma arbitraria por el experimentador y que, en particular, dicha elección puede efectuarse con absoluta prescindencia de B, que B no influencia las elecciones de los tiempos.

Sin embargo, si existieran los hipotéticos taquiones, sería imposible evitar la aparición de los llamados *ciclos acausales*, esto es, secuencias causa-efecto del tipo ABC... NA, en que, por ejemplo, B es el efecto de A y la causa de C, y así sucesivamente. Es evidente que en estos ciclos la *causa inicial* (A) no es independiente del efecto que en definitiva produce (N) y que por lo tanto la noción de causalidad pierde aquí su vigencia. Como ilustración, considérese el ciclo ABA, en que el observador A envía un taquión (una señal) al observador B, y que éste le contesta con otro taquión. Resulta siempre posible que la señal de B sea recibida por A antes de que él envíe su señal - ¡que es la que ha dado origen al ciclo! - y que por lo tanto B pueda interferir con la elección del tiempo  $t_A$  de emisión de la primera señal, perdiéndose así la relación causal.

La detección experimental de taquiones alteraría en consecuencia en forma radical la descripción de la naturaleza que ofrece la Física de hoy.

## EL TIEMPO EN LAS RELACIONES DE INCERTIDUMBRE

En un trabajo publicado en el año 1927 Heisenberg estableció una nueva y trascendente ley de la naturaleza, que rige los fenómenos físicos a la escala atómica: *el principio de incertidumbre*. De acuerdo con este principio es imposible medir simultáneamente y con absoluta precisión la posición en el espacio y la cantidad de movimiento de una partícula atómica, por ejemplo de un electrón. (La cantidad de movimiento o momentum, de una partícula, se define como el producto de su masa por su velocidad.) Si  $q$  representa una coordenada que mide la posición de una partícula y  $p$  la cantidad de movimiento correspondiente, entonces, en virtud del principio, estas variables sólo pueden conocerse con imprecisiones, o errores,  $Dq$  y  $Dp$ , respectivamente, tales que el producto de ambas queda medido por el valor numérico de una constante universal,  $h$ , que recibe el nombre de *constante de Planck*, esto es, se cumple que  $Dq \cdot Dp = h$ . (1)

La constante de Planck, que, medida en unidades adecuadas, resulta ser un

número extraordinariamente pequeño, juega sin embargo en Física un papel semejante al que desempeña la velocidad de la luz, en el sentido de que ambas establecen límites a nuestro conocimiento posible de la naturaleza. En efecto, supóngase que se desea conocer con absoluta precisión la posición de un electrón. Es por cierto posible diseñar un experimento que permita hacer esta medición, es decir, medir la coordenada  $q$  con un error  $Dq$  nulo ( $Dq = 0$ ), pero entonces, en virtud del principio, se pierde automáticamente toda información acerca de su cantidad de movimiento, puesto que para satisfacer la ecuación (1) en esas condiciones es necesario que  $Dp$  se haga infinito, ya que sólo el producto de infinito ( $= Dp$ ) por cero ( $= Dq$ ) puede dar como resultado el número diferente de cero - la constante de Planck - que aparece en el lado derecho de dicha ecuación. Ahora bien, conocer una cantidad con una imprecisión (o error) infinita es equivalente a no conocerla en absoluto; la medición exacta de la posición implica por tanto la pérdida de toda información acerca del momentum correspondiente. En otras palabras, es privilegio del observador elegir qué variable desea conocer con certeza absoluta, pero la naturaleza está construida de tal manera que su elección es siempre doble: elige qué conocer, pero al mismo tiempo elige qué no conocer.

Una consecuencia inescapable de esta situación es que la descripción de un sistema atómico (microscópico) es siempre y necesariamente menos detallada que la de un sistema físico macroscópico, lo que en definitiva se traduce en que se pierde el determinismo característico de la física clásica y se le reemplaza por una *probabilidad de ocurrencia* de sucesos.

Se conoce también una relación de incertidumbre que envuelve la energía ( $E$ ) de un sistema y un tiempo ( $t$ ) correspondiente, que tiene la forma de la ecuación (1).  
 $DE \cdot Dt \gg h.$  (2)

Sin embargo, el tiempo  $At$  que aparece en esta relación tiene un significado muy diferente del significado usual de la variable tiempo.

En efecto, para una dispersión  $DE$  de energía, el tiempo  $Dt$  correspondiente, obtenido de la ecuación (2), no representa en general una posible imprecisión en la medición del tiempo, lo que no tendría sentido físico, ya que en general el tiempo no es una variable que caracterice a un sistema particular, sino que resulta ser un tiempo que *mide el ritmo de evolución del propio sistema*, y que es característico de él. Como ya se señaló, en física atómica - en la teoría llamada Mecánica Cuántica - se pierde el determinismo clásico y lo que se predice es la probabilidad de que una medición de una propiedad observable del sistema en estudio arroje como resultado uno u otro de un conjunto de valores posibles, característico de la propiedad observada. Esta distribución estadística de resultados probables en general varía con el tiempo. El tiempo  $Dt$  que aparece en la relación (2) es el tiempo necesario para que esta distribución se encuentre notablemente modificada; en otras palabras, transcurrido el tiempo  $Dt$  ha cambiado sustancialmente el sistema mismo.

En el estudio de los procesos de decaimiento de las sustancias radiactivas se encuentra un ejemplo importante de aplicación de la relación (2); en este caso  $Dt$  representa la *vida media* del sistema. La ecuación (2) es también de la mayor importancia en el estudio de partículas producidas por el choque de otras partículas de muy alta energía. En este caso los productos de la reacción resultan ser partículas muy inestables, que "viven" sólo por tiempos del orden de  $10^{-23}$  segundos. Otra vez, el tiempo  $Dt$  mide aquí, a través de la ecuación (2), el tiempo de vida de estas partículas (y este es, por lo demás, el único modo posible de medir dicho tiempo).

Finalmente, es importante señalar que la relación de incertidumbre tiempo-energía conduce a la noción de *procesos virtuales*, que no tienen análogo en física clásica y que son fundamentales en física cuántica. En efecto, es bien sabido que la energía de un sistema (sistema cerrado) es una cantidad conservada, esto es, no varía en el tiempo. La ley de conservación de energía es uno de los pilares que sustentan el edificio de la física contemporánea. Sin embargo, al nivel subatómico (física nuclear, física de partículas) es posible que ocurran violaciones *virtuales* de esta ley, de magnitud  $DE$ , por períodos de tiempo  $Dt$  permitidos por la relación (2) para ese valor de  $DE$ . Estas violaciones son inobservables, pero dan origen a procesos reales. Por ejemplo, las fuerzas nucleares se entienden (en primera aproximación) como el intercambio de una partícula - el mesón  $p$  - entre dos nucleones (protón o neutrón, que son los constituyentes de los núcleos), esto es, un nucleón emite un mesón  $p$  y éste es luego absorbido por el segundo nucleón. Sin embargo, el proceso de emisión no es permitido como proceso real, porque violaría la ley de conservación de la energía; no obstante puede ocurrir y ocurre como proceso virtual. Todavía más, como consecuencia de los procesos virtuales toda partícula subatómica debe entenderse como en un proceso constante de emisión y absorción de otras partículas - para dar una imagen visual, como permanentemente envuelta en una nube de partículas virtuales. Ideas como éstas son básicas en física contemporánea y tienen su origen en la relación (2).

Desde que las relaciones de incertidumbre fueron propuestas por primera vez fueron vigorosamente atacadas por físicos de gran estatura - Einstein y Schrödinger entre ellos - que no aceptaban el carácter probabilístico de la teoría que emerge de ella: *Dios no juega a los dados*, es la frase de Einstein que simboliza con fuerza esta posición. Entre los años 1927 y 1930, en especial, a partir de la Conferencia de Como y las Conferencias del Instituto Solvay, los grandes físicos de la época debatieron la validez de las relaciones propuestas por Heisenberg. La oposición a ellas era encabezada por Einstein, en tanto que Bohr era portavoz principal de su defensa. Heisenberg ha recreado así la atmósfera de esas conferencias: *Las discusiones empezaban desde las primeras horas de la mañana, cuando Einstein en el desayuno nos explicaba un nuevo experimento teórico que contradecía, según su opinión, las relaciones de indeterminación. Iniciábamos inmediatamente el análisis, y, ya de camino hacia la sala de conferencias, en el que yo solía acompañar a Bohr y a Einstein, lográbamos una primera aclaración del problema planteado y de la tesis establecida. A lo largo del día volvíamos*

*muchas veces sobre el asunto, y, por lo general, resultaba que Niels Bohr durante la cena podía demostrar a Einstein que el experimento por éste propuesto tampoco podía soslayar las relaciones de indeterminación. Einstein mostraba entonces cierto desasosiego. Pero a la mañana siguiente, durante el desayuno, tenía ya preparado un nuevo experimento teórico más complicado aún que el del día anterior, que debería demostrar ahora de una vez para siempre la invalidez de las relaciones de indeterminación. Este nuevo intento no solía tener por la noche mayor éxito que el primero.*

En una de estas conferencias, en la del año 1930, Einstein propuso un ingenioso experimento pensado, que hacía uso de su famosa relación entre la masa y la energía (que es consecuencia directa de la Relatividad Especial) y que parecía contradecir la ecuación (2). Consistía el experimento en una caja cerrada, provista de una ventanilla que podía abrirse o cerrarse por medio de un mecanismo de relojería contenido en la caja.

Si al comenzar el experimento la caja contenía una cierta cantidad de radiación y el reloj se ajustaba para abrir la ventanilla por un brevísimo tiempo y en un instante elegido por el experimentador, era posible permitir la emisión de un único fotón (la partícula de luz) en un momento conocido con absoluta precisión. Todavía más, pesando la caja antes y después de este suceso y usando la equivalencia entre masa y energía podía medirse con exactitud también la energía, contradiciendo por tanto la correspondiente relación de Heisenberg.

La respuesta de Bohr - no una respuesta fácil - fue todavía más ingeniosa. Se basó en el hecho que, para medir la masa, es necesario desplazar el reloj en el campo gravitacional, y que este proceso, debido a la teoría de la Relatividad General, cambia las lecturas del reloj de una manera calculable según dicha teoría; al hacer estos cálculos la contradicción encontrada por Einstein desapareció y se reobtuvo en cambio la relación de incertidumbre correcta. ¡Einstein estaba equivocado porque había olvidado aplicar la más famosa de sus propias teorías!

## **ANTIMATERIA, REFLEXIÓN ESPECULAR E INVERSIÓN DEL SENTIDO DEL TIEMPO**

Las consideraciones hechas en torno al principio de incertidumbre deben haber dejado en claro que el *tiempo* que aparece en nuestra descripción del mundo microscópico no es el mismo que aparece en nuestra descripción del macrocosmos de los fenómenos que observamos en nuestra experiencia cotidiana. Desde este punto de vista, tal vez, no deba resultar demasiado insólito el hecho que una propiedad del tiempo macroscópico, que ha sido aceptada como evidente por la Física a nuestra escala, en apariencia no se cumpla al nivel de los fenómenos subatómicos: tal parece ser el caso de la llamada invariancia bajo *inversión temporal*.

Para entender el significado de esta simetría, o no-simetría, de las leyes físicas, parece adecuado considerar primero una simetría similar, pero referida al espacio

tridimensional, lo que la hace más intuitiva. Hasta el año 1957 se aceptó como evidente el hecho que las leyes de la Física deberían seguir siendo válidas si el mundo físico se reflejara en un espejo, esto es, se aceptaba sin discusión que el mundo físico reflejado no podría ser distinguido de un modo fundamental del mundo original. Este año se descubrió experimentalmente —la proposición original fue hecha por los físicos Lee y Yang— que esta supuesta simetría de la naturaleza, que recibe el nombre de *paridad* (y se designa con la letra P), era violada por los procesos responsables de los decaimientos radiactivos, procesos que son llamados interacciones débiles. Todavía más, este descubrimiento mostró que la violación de paridad era absoluta en estas interacciones es decir, que en ellas nada aparecía de la simetría izquierda-derecha (la reflexión especular intercambia la mano izquierda por la mano derecha) que es en cambio manifiesta en las interacciones nucleares y electromagnéticas.

Una operación similar a la de paridad es la de inversión del sentido del tiempo, que se designa con la letra T, y que consiste (matemáticamente) en hacer que el tiempo transcurra *hacia atrás*. Naturalmente, en el mundo real no podemos realizar esta operación - no hay un espejo que intercambie futuro y pasado - pero podemos imaginarla como el resultado de hacer pasar hacia atrás una película de una secuencia de sucesos. Suponiendo éstos de nuestra vida diaria, como un ejemplo, lo que veríamos en caso de hacerlo sería una nueva secuencia de sucesos, esta vez de ocurrencia altamente improbable en la vida real. Imagínese, para fijar ideas, una película que muestre el colapso de un castillo de naipes; si la película se pasara hacia atrás, se vería cómo los naipes, desparrama dos originalmente sobre una mesa, se ordenarían a sí mismos (lo que implicaría la acción de alguna fuerza), moviéndose en el sentido contrario de la gravedad para finalmente alcanzar el reposo en la forma de un castillo de naipes. Sin duda un fenómeno semejante nos parece imposible. Sin embargo, nada hay en la Física que conocemos que impida la ocurrencia de este proceso; se trata solamente de que la probabilidad de que ocurra es en extremo pequeña, de modo que puede ignorarse como un proceso real. Es desde este punto de vista que puede afirmarse que las leyes de la física son invariantes bajo la operación de inversión temporal.

Existe todavía una tercera operación, que recibe el nombre de *conjugación de carga* y se designa con la letra C, que consiste en intercambiar todas las partículas que componen el mundo físico por las correspondientes antipartículas. (Un resultado teórico de la mayor importancia, debido a Dirac, afirma que para que las leyes de la Relatividad Especial y la Mecánica Cuántica sean compatibles entre sí es necesario que por cada partícula que existe en la naturaleza debe existir una correspondiente antipartícula, idéntica a la anterior pero con *cargas* de signo contrario; por ejemplo, la antipartícula del electrón, llamada positrón, tiene carga eléctrica positiva.)

Hasta el año 1957 se supuso que las leyes físicas también eran invariantes bajo la operación C. Sin embargo, al descubrirse la violación de paridad se descubrió

también que esta invariancia era asimismo violada, e igualmente en forma absoluta, por las interacciones débiles. No obstante, este segundo descubrimiento permitió (Landau y otros) introducir una nueva simetría de las leyes físicas, su invariancia bajo la acción combinada, o producto, de estas dos operaciones. La invariancia GP emergió así como un nuevo orden en la naturaleza: si se refleja un sistema físico en un espejo y, al mismo tiempo, se intercambian partículas y antipartículas, el resultado es un sistema físico que también ocurre en ella.

Todavía más, existe en Física un teorema general, que se demuestra a partir de la aceptación de la validez de la Relatividad Especial y del principio de causalidad (amén de dos supuestos bien específicos pero de carácter demasiado técnico como para incluirlos en esta discusión), que afirma que la operación combinada CPT, esto es, el producto de estas tres operaciones, es siempre una simetría exacta de la naturaleza. Si se acepta este resultado, en consecuencia, la simetría GP implica que la operación T es también una simetría exacta del mundo físico. Esta situación duró hasta 1964, año en que Cronin, Fitch *et al.* descubrieron una pequeñísima violación de la invariancia GP, la cual, a través del teorema CPT, implica además que la Física no es invariante bajo la operación de inversión temporal: a nivel subatómico, *la naturaleza distingue una flecha del tiempo*.

Es necesario señalar, sin embargo, que esta última conclusión es de carácter indirecto, puesto que depende de la aceptación del teorema CPT. Es por cierto en principio posible que sea este último el que pierde su validez a nivel infraatómico y por lo tanto se mantenga allí la invariancia 1. Sin embargo, esto implicaría la no validez de alguno de los supuestos en la demostración del teorema, lo que es difícil de aceptar por parte del pensamiento ortodoxo de la Física actual. (Se ha encontrado también cierta confirmación experimental directa de no-invariancia bajo la operación T en el mismo sistema físico en que se ha medido la no-invariancia GP.)

En cuanto al origen e implicaciones de la no-invariancia GP, en los últimos años ha habido progresos teóricos que la relacionan con propiedades del mundo físico en sus dos extremos, el microcosmos de los subconstituyentes de los núcleos atómicos - las partículas llamadas *quarks* - y el macrocosmos de los fenómenos a la escala del Universo. En efecto, es posible demostrar que el quiebre de la simetría GP es inevitable si en la naturaleza existen más de cuatro variedades de quarks; hoy ya se conocen cinco. Por otra parte, la teoría contemporánea predice que el protón debe ser una partícula inestable, con un tiempo de vida del orden de  $10^{30}$  años. Esta predicción está siendo puesta a prueba por experimentos que se están realizando en este momento. Si resulta ser válida, entonces - como fue propuesto por primera vez por Zakharov - unido este hecho a la violación conocida de la invariancia CP, ello explicaría el considerable exceso de materia sobre antimateria que se observa hoy en el Universo.

La naturaleza, que a un cierto nivel de observación nos maravilla con la armonía de las proporciones con que aparece construida, exhibe de este modo pequeños quiebres de esa simetría, que a su vez nos maravillan por su delicada integración

en el conjunto total ¿Por qué ocurre así? Nadie puede hoy ofrecer una respuesta a esta pregunta, excepto desde fuera del marco de la Física. Como las frases que elige Feynman para terminar el primer volumen de su libro *Lectures on Physics*:

*Lo único que podemos sugerir como explicación es algo como esto: Hay una puerta en Neiko, en Japón, a la que los japoneses califican a veces como la más hermosa de todo el país. Fue construida en una época en que era grande la influencia del arte chino. Es muy elaborada, con muchos tallados, hermosas columnas y cabezas de dragones y de príncipes esculpidas en los pilares. Pero al contemplarla de cerca se descubre que en el complejo y elaborado diseño de uno de los pilares hay un pequeño motivo que fue tallado boca abajo; excepto por esto, el total es completamente simétrico. Cuando se pregunta por qué, la leyenda responde que fue hecho así para que los dioses no se sintieran celosos de la perfección de los hombres. Se introdujo intencionalmente un error para evitar que el celo de los dioses los hiciera enojarse con los seres humanos.*

*Podríamos dar vuelta la leyenda y pensar que la verdadera explicación de la simetría no total de la naturaleza es ésta: Dios hizo las leyes de la naturaleza sólo aproximadamente simétricas para que no sintiéramos celos de su perfección.*