

A la búsqueda del tiempo físico

SHAHEN HACYAN



¿Qué es el tiempo? “Si no me lo preguntan, lo sé. Si me preguntan, no lo sé”, contestó San Agustín a tan difícil cuestión. Y es que todos sabemos intuitivamente lo que es el tiempo, pero de ahí a definirlo... En este artículo trataremos de fijarnos una meta un poco más modesta y plantearnos la pregunta: ¿qué es el tiempo de la física?

Newton, Maxwell, Einstein

1. El tiempo absoluto, verdadero y matemático por sí mismo y por su propia naturaleza, que fluye sin relación con nada externo.

2. El tiempo relativo, aparente y común, que es medida sensible y externa de la duración por medio del movimiento.

El tiempo relativo es el que se mide con relación al movimiento de algo —maquinaria de un reloj, rotación de la Tierra, etc.— cerrando así un círculo tautológico: el tiempo se mide con el movimiento y el movimiento con el tiempo. Según Newton, esta medición del tiempo no puede ser precisa y debe ajustarse continuamente con el tiempo absoluto. Newton parece despreciar el tiempo relativo, el de los “hombres comunes”, a favor de un tiempo absoluto, independiente de todo. Pero su razonamiento es poco convincente, pues nunca aclara cómo se accede a ese tiempo absoluto.

A pesar de todo, el tiempo absoluto quedó firmemente establecido en la ciencia clásica. Para un físico, ese tiempo sería el parámetro t que aparece en todas las ecuaciones que describen el movimiento de los cuerpos, y correspondería aproximadamente con el tiempo común medido con aparatos humanos. Esta visión del mundo habría de subsistir hasta principios del siglo XX, cuando Einstein mostró que el tiempo absoluto es una ilusión.

A mediados del siglo XIX el gran físico escocés James Clerk Maxwell demostró que la electricidad y el mag-

netismo obedecen leyes matemáticas muy precisas, al igual que la gravitación —como lo había mostrado Newton. Las ecuaciones de Maxwell describen los campos eléctricos y magnéticos en cada punto del espacio y en cada instante de tiempo (en términos matemáticos, dichos campos dependen de la posición espacial y del tiempo, es decir, las coordenadas x, y, z, t). Sin embargo, desde un principio surgió un problema: si se cambian las coordenadas espaciales a un sistema de referencia en movimiento, las ecuaciones de Maxwell cambian de forma y se vuelven mucho más complicadas. Este hecho, más que una dificultad de la teoría, parecía reforzar la idea de un espacio y un tiempo absolutos, que serían el escenario donde ocurren los fenómenos electromagnéticos descritos por las leyes de Maxwell.

Sin embargo, a fines del siglo XIX, Hendrik Lorentz demostró que existe una transformación de coordenadas que deja invariante la forma de las ecuaciones de Maxwell, siempre y cuando se cambien no sólo las coordenadas espaciales, sino también el tiempo. Pero esto parecía ser sólo una curiosidad matemática.

Tal era la situación cuando, en 1905, apareció en una prestigiosa revista alemana de física un artículo titulado "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento", por Albert Einstein. Con este trabajo nació la teoría de la relatividad.

Einstein postuló que las ecuaciones de Maxwell deben tener la misma forma en cualquier sistema de referencia y que, por lo tanto, es imposible privilegiar un sistema de referencia con respecto a otro.

Este es el principio de relatividad; para que se cumpla es necesario que la transformación de coordenadas descubierta por Lorentz tenga realidad física. La consecuencia más revolucionaria es que *el tiempo depende del movimiento de quien lo mide*. Einstein tiró por la borda,



Armonía, 1956, Remedios Varo

sin misericordia, el tiempo absoluto de Newton.

Relatividad

Un postulado fundamental de la teoría de la relatividad es que la velocidad de la luz (en el vacío) —que es de unos 300 000 kilómetros por segundo— es la misma para cualquier observador. Esto parece contradecir toda experiencia: por ejemplo, se esperaría que al correr detrás de una señal luminosa, ésta pareciera tener una velocidad menor, pero la velocidad de la luz siempre será la misma. La razón es que las velocidades no se adicionan o restan simplemente, como en la mecánica clásica, ya que se debe tomar en cuenta que el tiempo cambia para un observador en movimiento.

Así, el tiempo no transcurre de la

misma forma para observadores distintos, a pesar de que nuestro sentido común, basado en la práctica cotidiana, indica que los relojes no se adelantan o atrasan por estar en movimiento. Sin embargo, el efecto predicho por Einstein sólo es perceptible a velocidades cercanas a la de la luz.

Más precisamente, si en cierto sistema de referencia dos sucesos ocurren en *el mismo lugar*, pero con un intervalo de tiempo t , entonces, en otro sistema de referencia que se mueve con velocidad V con respecto al primero, los dos sucesos ocurren con un intervalo de tiempo t' dado por la fórmula:

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}$$

donde c es la velocidad de la luz. A partir de esta fórmula, se ve que la diferen-



La huida, 1962, Remedios Varo

cia de los dos tiempos es completamente imperceptible para velocidades muy bajas con respecto a la velocidad de la luz, como es el caso de nuestra experiencia diaria; por esto, la contracción del tiempo había pasado desapercibida hasta que apareció la teoría de Einstein.

Para dar un ejemplo, supongamos que una nave espacial viaja a la estrella más cercana, *Alfa Centauri*, que se encuentra a cuatro años luz de distancia (al tratar distancias cósmicas, se suele utilizar el año luz como unidad de me-

didada: es la distancia recorrida por la luz en un año y equivale a unos nueve billones de kilómetros). Los tripulantes de la nave no sentirán nada particular con respecto a su tiempo, ya que sus relojes marcharán normalmente. Será su regreso a la Tierra cuando notarán que sus relojes y los de la Tierra no coinciden: el tiempo medido en la nave, desde que salió hasta que regresó, será más corto que el tiempo medido en la Tierra de la acuerdo con la fórmula que dimos más arriba.

Si, por ejemplo, la velocidad de la

nave es de 299 000 kilómetros por segundo, transcurrirán poco más de ocho años, medidos en la Tierra, desde que la nave despegó hasta que regresa, pero para los tripulantes habrán pasado solamente... ¡siete meses!

Gravitación

En 1915, Einstein presentó una extensión de su teoría, conocida como relatividad generalizada, que incluye también la fuerza gravitacional. Sin entrar en los detalles de esta teoría (lo que nos llevaría demasiado lejos), mencionemos que la relatividad del tiempo vuelve a aparecer con relación al campo gravitacional. En efecto, el tiempo transcurre más lentamente donde la gravedad es más intensa.

Por ejemplo, debido a que la gravedad de la Tierra es ligeramente mayor en el suelo que en la parte alta de un edificio; un reloj en la planta baja debería atrasarse con respecto a uno en la azotea. En la práctica, este efecto es demasiado pequeño para notarse, pero el fenómeno fue comprobado en forma espectacular por R. V. Pound y G. A. Rebka en 1960 en una torre de 22 metros de altura. El cambio en el tiempo es de apenas una diez milésima de millonésima de segundo por cada hora transcurrida, pero Pound y Rebka pudieron medir ese cambio y comprobar que corresponde perfectamente a lo predicho por Einstein.

Pero la manifestación más extrema de la relatividad del tiempo se da en esos curiosos objetos predichos teóricamente por la relatividad general: los hoyos negros. Esencialmente, un hoyo negro es una concentración de masa tal que su atracción gravitacional impide que la luz, o cualquier objeto, se escape de su superficie. Las estrellas, al final de sus vidas, cuando han agotado todo su combustible nuclear y dejan de brillar, se contraen por su propia fuerza gravitacional. En el caso de las estrellas muy masivas —unas siete veces o

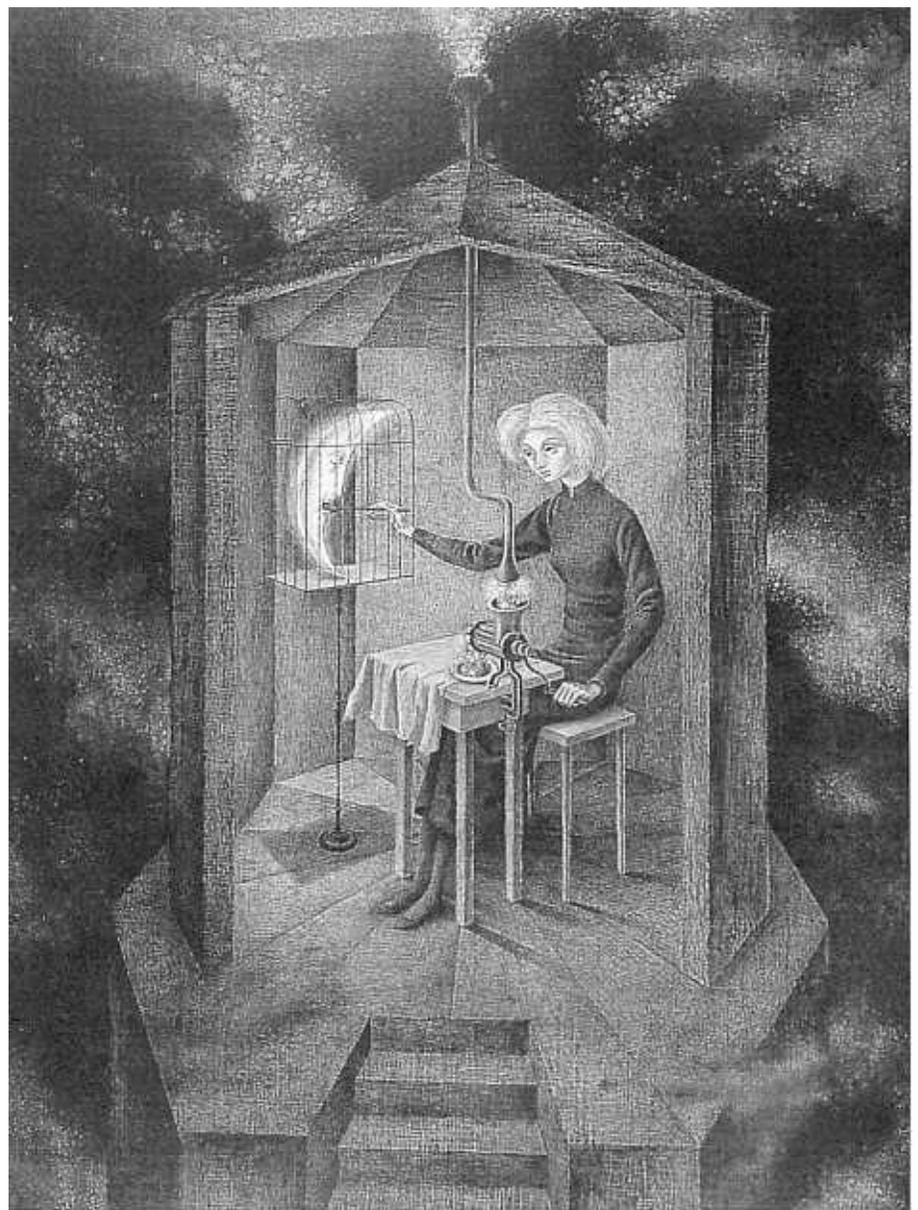
más que el Sol—, la evolución puede ser muy complicada, pero eventualmente la estrella, o al menos su parte central, tiene que transformarse en hoyo negro y los astrónomos han encontrado evidencias de estos extraños objetos en nuestra galaxia.

Para nuestros fines, señalemos que un hoyo negro se caracteriza por una superficie, llamada horizonte, que es una esfera de unos 3 kilómetros de radio por cada masa solar (por ejemplo, un hoyo negro de 10 masas solares tiene un radio de 30 kilómetros); el interior del horizonte está desconectado del Universo externo y no podemos verlo, a menos que penetremos en él en un viaje de un solo sentido.

Supongamos que una nave espacial cae en un hoyo negro y que ese suceso trágico es observado desde un planeta a prudente distancia. Los tripulantes de la nave que cae no notarán nada especial durante su camino: cruzarán el horizonte, digamos a las 12 horas, y seguirán su viaje, hasta que en algún momento las fuerzas de marea del hoyo negro se vuelvan tan intensas que destruyan la nave. Ahora bien, todo el proceso, visto desde lejos, será muy distinto: se verá a la nave que cae, pero su tiempo irá deteniéndose a medida que se acerca al horizonte. Después de mucho tiempo se verá el reloj de la nave marcar, por ejemplo, las 11:58; después de varios años, siempre medidos desde lejos, marcará las 11:59; y así sucesivamente sin nunca alcanzar las 12:00. Visto desde el planeta lejano, el tiempo en la nave atrapada por el hoyo negro se congela con respecto al tiempo externo. Un tiempo finito para un observador es infinito para otro: ¡qué mejor ejemplo de relatividad del tiempo!

Máquinas del tiempo

Según la teoría de la relatividad de Albert Einstein, ningún cuerpo puede moverse más rápidamente que la luz,



Papilla estelar, 1958, Remedios Varo

pues se necesitaría una cantidad infinita de energía para alcanzar tal velocidad. Para fines terrenales, esta limitación no es tan grave. A la velocidad de la luz se puede dar hasta ocho vueltas a la Tierra en un segundo. Sin embargo, para fines de comunicación en el Universo, la luz es demasiado lenta. Por ejemplo, un viaje interestelar al centro de nuestra galaxia a una velocidad cercana a la de la luz tomaría unos treinta mil años medidos en la Tierra, y si bien la contracción del tiempo jugaría a favor de los tripulantes, la travesía requeriría mucho más

energía que toda la disponible en nuestra planeta.

¿Se puede, entonces, encontrar algo así como un atajo para poder viajar a regiones lejanas del universo? Curiosamente, la teoría de la gravitación de Einstein no excluye tal posibilidad. Al menos en principio, podrían existir túneles cósmicos que conecten regiones muy distantes del Universo. Un viajero cósmico que penetre uno de esos túneles recorrería una distancia relativamente corta y emergería en una región muy lejana del Universo. Esto le permitiría vencer la barrera de la velocidad de la luz.



Sin embargo, de acuerdo con la misma teoría de Einstein, un viaje a mayor velocidad que la luz es equivalente a un viaje en el tiempo. Esto se debe a que el tiempo es un concepto relativo: el intervalo de tiempo entre dos sucesos depende de quién lo mide, pero para un hipotético viaje a mayor velocidad que la luz, el tiempo no sólo se contrae sino que... ¡se invierte!

Supongamos que una nave espacial penetra un túnel cósmico por uno de

sus extremos, sale por el otro y luego se vuelve a meter para regresar a la Tierra. Se puede demostrar que si uno de los extremos del túnel cósmico se mueve con una cierta velocidad, un viajero podría regresar a su punto de origen ¡antes de haber salido! Según la teoría de la relatividad, viajar más rápido que la luz implica también viajar hacia atrás en el tiempo.

Somos viajeros sin reposo en el tiempo, pero nuestro viaje es en una sola dirección: del pasado al futuro.

¿Por qué el tiempo corre en una sola dirección? Esta pregunta no es tan trivial como parece, ya que las leyes de la mecánica no implican que el tiempo tenga que fluir en un sentido o en otro. Si uno cambia el signo del tiempo en las ecuaciones de la física, nada cambia: lo que se mueve en un sentido también se mueve en otro. Esas mismas leyes describen a la perfección el comportamiento de la materia, pero la dirección del tiempo está escondida en alguna región aún mal comprendida por la ciencia moderna.

Hasta ahora, el único concepto físico que implica una dirección del tiempo es la *entropía*. Pero éste es un concepto estadístico, que se aplica sólo a conjuntos muy grandes de partículas (moléculas, átomos). La entropía es en cierto sentido una medida del desorden. Por ejemplo, el agua en un vaso que cae al suelo y se derrama aumenta su entropía, y no es de esperar que el proceso contrario —el agua del suelo se junta y brinca al vaso— ocurra. Esto se debe a que el segundo proceso es billones y trillones de veces menos probable que el primero, pero si miramos microscópicamente las moléculas del agua, no podremos distinguir entre los dos procesos, ya que sólo veríamos moléculas moviéndose de acuerdo a las leyes de la física.

Pero, finalmente, si la física conocida hasta ahora no excluye la posibilidad de viajar hacia atrás en el tiempo, sí la excluye la lógica. En efecto, ¿qué pasaría si alguien viaja al pasado, encuentra un niño que es él mismo y se asesina? Deben existir leyes de la física que impidan una situación tan absurda; lo curioso es que esas leyes todavía no se han descubierto. Quizá debemos esperar una nueva teoría que explique el misterio de la dirección del tiempo. ●

Shahen Haeyan, Instituto de Física, UNAM.