

el tiempo en la física

El nacimiento de la física moderna supone también el nacimiento del concepto de tiempo físico, al producirse la matematización del tiempo. Uno de los primeros problemas que ocuparon a la física fue el estudio de las leyes del movimiento de los cuerpos, tratado ya por Juan Buridán (1300-1358) y Galileo Galilei (1564-1642), y completadas en los trabajos de otros de los padres de la física. Sin duda es Isaac Newton (1642-1727) quien pone los puntales más importantes en el edificio de la física moderna.

Los conceptos de espacio y de tiempo newtonianos, junto con el enunciado de las leyes de movimiento, serán utilizados para explicar fenómenos naturales que irán desde el movimiento acelerado de los objetos sobre la Tierra hasta el movimiento de los planetas en el Sistema Solar. El espacio, según el modelo que propone Newton, tiene categoría de sustancia a través de la cual se mueven los cuerpos materiales y las radiaciones. La distancia espacial entre dos acontecimientos es un concepto independiente del instante en el que tienen lugar.

El tiempo es independiente de las cosas, y mientras las cosas cambian, el tiempo no cambia. Los cambios de las cosas son, pues, cambios en relación con el tiempo uniforme que le sirve de marco vacío. Newton publica en 1687 su obra cumbre, *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*. Allí nos dice: El tiempo absoluto, real y matemático, por sí mismo y por su propia naturaleza, fluye igualmente sin dependencia de cualquier cosa externa y, por otro nombre, se denomina duración. El tiempo es un ente que fluye, que se mueve unidimensionalmente en una sola dirección, y que se puede expresar como un parámetro matemático. Existe un tiempo absoluto, un marco vacío en el que se suceden las cosas, y el tiempo no tiene acción causal sobre las mismas.

El principal discípulo de Newton, Samuel Clarke (1675-1729) mantuvo con Gottfried W. Leibniz (1646-1716) una interesante discusión acerca de la naturaleza del espacio y del tiempo. Para Leibniz el tiempo es el orden de existencia de las cosas que no son simultáneas. Así, el tiempo es el orden universal de los cambios cuando no tenemos en cuenta las clases particulares de cambio. Así como el espacio es un orden de coexistencias, el tiempo es un orden de sucesiones. El tiempo es, en tanto que relaciona y ordena sucesos, no como marco absoluto en el que suceden las cosas (postura newtoniana defendida en la polémica por Clarke), sino como ligadura entre ellas.

La visión newtoniana fue aceptada por la física hasta las críticas de Ernst Mach (1839-1916) y finalmente fue rechazada con los trabajos de Albert Einstein (1879-1955) a principios de siglo.

Para ilustrar como las concepciones físicas cambian con la aportación de Einstein resulta interesante considerar el concepto de simultaneidad. En la mecánica newtoniana el tiempo es absoluto y universal y la característica de simultaneidad se atribuye a hechos con independencia del lugar donde ocurren.

En la teoría de la relatividad espacial, enunciada por Einstein en 1905, el tiempo se relativiza por entero al hacerse función de un sistema de referencia, desde el cual se efectúan todas las observaciones y medidas. No hay simultaneidad absoluta.

La teoría se basa en dos postulados:

1. La velocidad de la luz en el vacío es constante e igual a 300,000 km/s independientemente de la velocidad relativa del observador.
2. Todas las leyes de la naturaleza son iguales para todos los observadores.

Es la relatividad del tiempo, unida a las demás relatividades, la que hace posible que todas las leyes del Universo sean iguales para todos los observadores. La teoría descarta un hipotético observador cósmico (factible para Newton) para el cual el tiempo sería absoluto.

Veamos cómo con los postulados de la teoría especial de la relatividad la simultaneidad se convierte en un fenómeno relativo y no absoluto, es decir, el hecho de que dos acontecimientos sean simultáneos deja de ser una propiedad absoluta de ellos mismos y pasa a depender de cómo son observados.

El ejemplo clásico que ilustra esta afirmación es el de imaginar un tren que se desplaza a gran velocidad por una vía. (En el experimento imaginario esa velocidad debe ser próxima a la velocidad de la luz). Si en el centro de un vagón un viajero envía en un instante dado un destello luminoso hacia las paredes delantera y trasera del vagón, éste observará que los destellos llegan a ambas paredes en el mismo instante, y por lo tanto, para él serán hechos simultáneos. Consideremos ahora un observador que se encuentre en el andén, de tal manera que las señales luminosas sean enviadas justo cuando el viajero del interior pasa delante de él. Dado que durante el tiempo que la

luz, viajando a velocidad finita, tarda en llegar a las paredes del vagón, el tren se desplaza por la vía un cierto espacio, el observador del andén determinará que la luz llega antes a la pared de detrás que a la de delante, ya que para él la distancia que la luz ha de recorrer para llegar a ambas paredes ya no es la misma. La pared de delante huye de la señal luminosa mientras que la de detrás se acerca. Para el observador del andén la llegada de la luz a las paredes delantera y trasera del vagón son hechos no simultáneos. Ambos observadores están en lo cierto al describir el experimento. Insistimos en el hecho del primer postulado de la relatividad especial : el hecho de que la fuente que emite la señal luminosa esté en movimiento respecto al observador del andén no afecta al valor de la velocidad de la luz. Para él esta velocidad es la misma que para el viajero del interior del vagón.

La aparente paradoja desaparece cuando aceptamos que el concepto de simultaneidad depende del sistema de referencia que utilizamos para situar los acontecimientos. En la física de Newton había un único tiempo, medido por relojes universales, la relatividad impone cambiar ese concepto absoluto por un tiempo medido por cada observador en su sistema de referencia y provisto de un reloj. Los relojes en movimiento cambian de ritmo.

En el estudio de las leyes del movimiento de los cuerpos fue fundamental el desarrollo de una herramienta matemática, a finales del S.XVII, por parte, simultáneamente, de Isaac Newton y de Gottfried W. Leibniz : el cálculo infinitesimal. El movimiento de los cuerpos es descrito de forma matemática por medio de ecuaciones diferenciales y estas ecuaciones necesitan utilizar el concepto de infinitésimo. Se trata de relacionar cantidades muy pequeñas de espacio (desplazamientos muy pequeños) con cantidades muy pequeñas de tiempo. El tiempo se supone así un ente continuo que fluye y que puede ser dividido en fracciones muy pequeñas, infinitesimales.

El concepto de infinitésimo, de tiempo infinitesimal, no fue comprendido en toda su extensión hasta ya entrado el siglo XIX, fue criticado duramente por George Berkeley (1685-1753), y como muestra de las críticas podemos incluir los comentarios del agudo Voltaire (1694-1778): El cálculo infinitesimal es el arte de numerar y medir exactamente una Cosa cuya Existencia no puede concebirse.

Fue Augustin-Louis Cauchy (1789-1857) en 1821 con su Cours d'Analyse quien introdujo el concepto de límite, mejorado cincuenta años después por Karl Weierstrab (1815-1897) y permitió comprender un tiempo infinitamente subdivisible, un tiempo continuo.

Pero Werner Heisenberg (1901-1976) rompió el concepto de un tiempo continuo e infinitamente fraccionable, al postular el Principio de Incertidumbre en 1927, dentro del campo de la mecánica cuántica. Este principio indica que cuanto más precisa sea la determinación del valor de la energía de una partícula tanto menos precisa será la determinación de la coordenada temporal, según la relación :

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

Este principio prueba que no hay estados instantáneos, y que hay que aceptar una condición discreta del tiempo. Para la microfísica, por tanto, el tiempo no aparece como el continuo fluyente de la microfísica, sino como algo discontinuo, granular e irregular. Podría tener una naturaleza similar a la de las partículas elementales. Se podría, pues, hablar de cronones, partículas de tiempo

Hemos visto, pues, cómo la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica rompen, a principios del S.XX, dos esquemas clásicos en la concepción del tiempo por parte de la física. Por un lado se supera el concepto de tiempo, como marco absoluto e independiente del sistema de referencia utilizado, y por otro, el concepto de tiempo como continuo fluyente, para llegar a un tiempo discreto en el orden de la microfísica.

Para medir el tiempo se han utilizado desde la antigüedad fenómenos que se repiten de forma regular. La astronomía aporta unidades como el día o el año a partir de los períodos de rotación de la Tierra sobre su eje o de traslación alrededor del Sol. Estos relojes astronómicos se han visto relegados en la actualidad por relojes atómicos muchos más precisos. De hecho la unidad básica de tiempo es el segundo y su "definición" que podemos encontrar publicada en el BOE del 3 de Noviembre de 1989 dice así : el segundo es la duración de 9,192,631,770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133.

Si hasta aquí hemos pretendido responder a la pregunta de QUÉ es el tiempo para los físicos, vamos a intentar dar una respuesta a otra pregunta que se suele plantear : CÓMO AVANZA el tiempo. ¿En qué dirección camina?.

Para ello el astrónomo británico Arthur Stanley Eddington (1882-1944) introdujo el concepto de flecha del tiempo. A partir de varios hechos físicos se puede decir hacia dónde apunta la flecha del tiempo, en qué sentido avanza éste. Para las leyes de la mecánica, el electromagnetismo ó la mecánica cuántica, la física es simétrica respecto al tiempo.

Sin embargo, hay varios hechos que no lo son, y éstos permiten definir cuatro flechas del tiempo distintas.

La primera y más importante es la flecha del tiempo termodinámica. Se basa en la segunda entropía, aumenta siempre en los procesos físicos.

Un ejemplo ilustrativo es el siguiente: imaginemos una caja que contiene dos compartimentos separados por una pared, uno de ellos lleno de gas y el otro vacío. Si eliminamos la pared que separa ambos compartimentos, el gas se expandirá y llenará ambos espacios.

Se habrá llegado así a una situación de mayor desorden, con el gas se expandirá y llenará ambos espacios.

Se habrá llegado así a una situación de mayor desorden, con el gas más extendido. Jamás podremos volver a la situación inicial, en la cual todo el gas estaba en el mismo

compartimento, por mucho tiempo que dejemos moverse a las partículas del gas. En este proceso irreversible ha aumentado el desorden, la entropía del sistema.

Diremos, pues, que un aumento de entropía es un aumento de cantidad de tiempo.

El tiempo crece, avanza en el mismo sentido en el que crece la entropía. Esta es la primera flecha del tiempo.

La segunda flecha es la del tiempo cósmico. Edwin Hubble (1889-1953) descubrió en 1929 que el Universo se expande. A partir de ahí se puede definir el avance del tiempo en el sentido en el que crece el Universo. Este será el tiempo cósmico. La flecha del tiempo crece con la expansión del Universo. Existe un principio para ese tiempo, el instante de la Gran Explosión, hace 15,000 millones de años.

No sabemos si en el futuro el Universo dejará de expandirse, pero por ahora podemos definir así esta flecha del tiempo.

La tercera flecha del tiempo parte de otro fenómeno físico : la desintegración radiactiva de los elementos. Nada hay en las leyes de la microfísica que impida que una partícula que se desintegra en tres partículas distintas puede sufrir el fenómeno inverso, que las tres confluyan y creen la partícula original, como ocurriría en una película de vídeo pasada hacia atrás. Nada hay que impida este proceso, pero no se observa. Los átomos se desintegran, y podemos definir una flecha del tiempo que crece en el sentido en el que los átomos se desintegran. El antes y el después de las desintegraciones radiactivas nos dan el sentido de avance de esta flecha del tiempo.

La cuarta flecha del tiempo es la electro magnética, la de las ondas de luz. Del mismo modo que se propagan en círculos concéntricos hacia el exterior las ondas que produce una piedra al caer en un estanque y no vemos jamás que estas ondas converjan hasta anular el efecto de una piedra que cae, la radiación electromagnética se propaga en un sentido, aunque las leyes de la física permitan el proceso inverso -que no se observa-. Las ondas de la luz no convergen en esferas concéntricas hacia una bombilla o una estrella, sino que siempre lo hacen al revés. Este sentido de crecimiento en la propagación de las ondas electromagnéticas nos define el sentido de avance de la cuarta flecha del tiempo.

Hemos visto que cuatro procesos físicos no simétricos respecto al tiempo nos definen cuatro flechas del tiempo : el aumento de la entropía, la expansión del Universo, la desintegración radiactiva y la propagación de las ondas electromagnéticas.

Podríamos hablar de una quinta flecha del tiempo, una flecha de la cual no se ocupan los físicos : la psicológica, la flecha de la conciencia humana, que nos permite distinguir el pasado del futuro, la flecha que nos hace tener recuerdo de lo acontecido y saber que hay un tiempo por venir. Hablar de la relación entre las cuatro flechas que define la física y la quinta flecha, sería algo mucho más difícil, que se escapa a nuestro artículo, y las preguntas que plantea ya no pueden ser contestadas sólo por los físicos....

Porque una cosa es la interpretación que de la realidad y del tiempo hace la física, y otra distinta la percepción que de ellos tiene el hombre, y tal vez estos dos aspectos son muy, muy lejanos de lo que la realidad y el tiempo verdaderamente SON.

Vicent J. Martinez & Eduardo Ros

Departament d'Astronomia i Astrofísica.

Universitat de València.

BIBLIOGRAFIA.

Las flechas del tiempo. R. Morris. Salvat (Barcelona), 1989.

Diccionario de Filosofía. J. Ferrater Mora. Círculo de Lectores, 1991.

Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas. G. Holton. Reverté (Barcelona), 1989.

El espacio y el tiempo en el universo contemporáneo. P.C.W. Davies. Fondo de Cultura Económica (México), 1982.

L'evolució de la física. A. Einstein & L. Innfeld. Edicions 62, Barcelona, 1984.