

UNA EXPLICACION SENCILLA DE LA SIGNIFICACION FISICA DE LA TEORIA DE LA RELATIVIDAD RESTRINGIDA (*)

Por LUIS PRIETO DELGADO

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

La teoría de la relatividad ha dado lugar a la pretensión de considerar aniquilados los fundamentos intuitivos sobre la estructura del espacio y del tiempo. Las hipótesis relativistas manejan distancias, movimientos y duraciones de cosas físicas, pero dislocando sus relaciones de tal manera que resulta imposible una reconstrucción coherente del mundo en que ocurren. Como dice Lecompte de Nouy, se trata de una interpretación que traduce la realidad de un modo que es inaccesible a la intuición. Es frecuente una actitud, ante esta teoría, que puede definirse con las palabras de Fabre, al declarar que "dada la imposibilidad de entender los principios relativistas, debemos contentarnos con contrastar sus consecuencias con la realidad, para ver si las confirma". Esta actitud encierra un grave error. Una teoría no es una verdad experimentalmente comprobable, sino un intento de interpretación de ciertos hechos reales. Y lo primero a exigir es que resulte comprensible. Como dice Planck, "no existe ninguna cuestión física que directamente, sin la interposición de supuestos convencionales de orden físico, pueda ser comprobada mediante mediciones". Una teoría, estando construida en vista de los hechos conocidos, comienza naturalmente por satisfacerlos. Es, como dice Eddington, una idea, no un hecho experimental. Y como tal idea, su comprobación no puede consistir más que en resultar inteligible, en no encerrar contradicciones internas ni enigmas indescifrables. ¿Qué significan realmente los postulados de la relatividad? En las siguientes líneas se trata de exponer la interpretación física clara y sencilla que se esconde tras su aparente hermetismo.

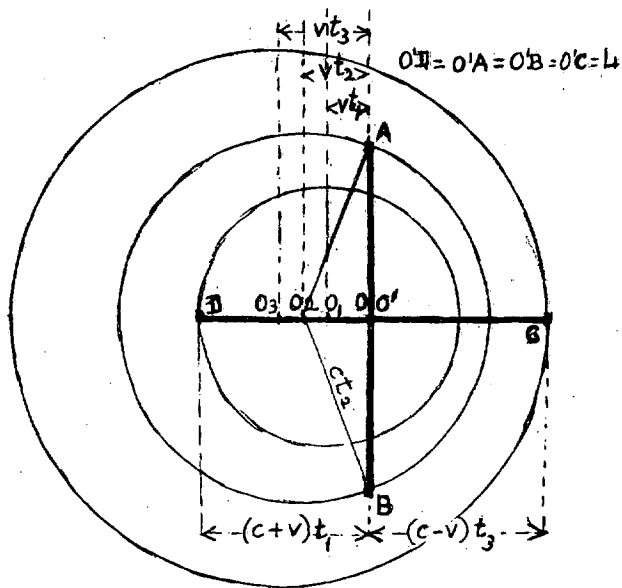
Con la brevedad posible, resulta necesario recordar las interpretaciones de algunos hechos, de acuerdo con la física clásica, como apoyo para interpretar después su significación en física relativista.

La imagen clásica de los movimientos cósmicos supone la existencia de un sistema privilegiado, representable por un triedro cuyo vértice es el centro de gravedad del sistema solar, estando sus aristas ligadas a tres estrellas fijas. Este sistema fundamental se considera en reposo absoluto y respecto a él inmóvil el éter, concebido como una entidad física dotada de la cualidad de extensión, en la que los cuerpos ocupan lugar y los movimientos se propagan. Un segundo grupo de sistemas puede formarse con los astros sobre los que no actúan fuerzas exteriores y tienen un movimiento de traslación rectilínea y uniforme respecto al sistema fundamental. Un tercero con aquellos cuyo movi-

miento sufre variaciones a causa de acciones externas. Las experiencias de Doppler y Fizeau muestran que la propagación de la luz no es influenciada por el movimiento del foco que la emite, y en todos los casos se propaga en el éter con la misma velocidad, c , en cualquier dirección. Pero respecto al foco emisor, si su velocidad respecto al éter es v , la de la luz será diferente para cada dirección de propagación. Cuando el rayo camina en sentido del movimiento del foco, será $c - v$. Si camina en sentido opuesto será $c + v$.

La experiencia de Michelson trata de comprobar experimentalmente lo que sucede cuando el foco emisor está situado en la Tierra, suponiendo que el movimiento de ésta puede considerarse uniforme y rectilíneo durante el breve tiempo de las observaciones. El aparato de Michelson, integrado por un foco de luz y tres espejos fijados en un bloque de granito, permitía medir por medio de un interferómetro la diferencia de velocidad de la luz, en viaje de ida y vuelta, en dos trayectos perpendiculares

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de enero de 1973.



de la misma longitud, resultando que tarda lo mismo en ese viaje cualquiera que sea la orientación del aparato.

Un sencillo cálculo muestra que no debía ser así. Si tomamos como referencia el foco móvil, O' , coincidente con el origen, O , de un sistema de coordenadas fijo, en el instante $t = 0$ de salida del rayo, el centro O se irá desplazando respecto al O' con velocidad igual y contraria a la de éste. Los caminos recorridos por la luz dibujarán superficies esféricas con centro en los lugares que vaya ocupando O respecto a O' . Si llamamos L a la longitud recorrida por la luz en ida o vuelta en el aparato de Michelson, se tendrá, como duración del viaje de ida y vuelta, en sentido del movimiento:

$$t_1 + t_3 = \frac{2L}{c} \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

En sentido perpendicular al del movimiento la duración del viaje de ida y vuelta sería:

$$2t_2 = \frac{2L}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Resulta $t_1 + t_3 > 2t_2$, contra lo que la experiencia revela. Lorentz interpretó este resul-

tado experimental mediante la hipótesis de acortamiento de los sólidos por su movimiento absoluto. Una barra de un metro cambiaría de longitud según su posición, siendo máximo su acortamiento en sentido de su movimiento y nulo en dirección perpendicular. Una esfera, al moverse, se transformaría en un elipsoide. Y el bloque del aparato de Michelson, al variar sus medidas de ese modo, explicaría el resultado de la experiencia, es decir, el que la luz tarde siempre igual en viaje de ida y vuelta en cualquier dirección.

Según advirtió Poincaré, la experiencia podría también interpretarse mediante otras hipótesis, como la de suponer que la luz, al salir de focos móviles, se propaga en forma de elipsoides aplastados, aunque al cabo de cierto tiempo pueda alcanzar regularidad esférica. La mayor lentitud de la propagación en sentido transversal explicaría el resultado de la experiencia, en lugar de la suposición de acortamiento de los cuerpos en sentido del movimiento.

Pasemos al examen de las transformaciones de Lorentz. Se considera el sistema fundamental, en reposo, y otro móvil, referidos a ejes cartesianos, coincidiendo los ejes de las x con el sentido del movimiento. Siendo $t = 0$ en el momento de coincidencia de orígenes, tendremos relacionadas las coordenadas de un suceso respecto a uno y otro sistema del modo siguiente:

$$x' = x - v \cdot t \gg y' = y \gg z' = z \gg t' = t.$$

Se puede fácilmente calcular una transformación de coordenadas que deje invariante la propagación de la luz, al pasar del sistema fijo al móvil, del modo siguiente:

Hipótesis física. — Las ondas son rigurosamente esféricas.

Interpretación de la experiencia. — Los sólidos se acortan diversamente según su posición respecto a la dirección de su movimiento absoluto. En esa dirección, el metro acortado es igual al normal por

$$\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Tendremos:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1)$$

La abscisa de un lugar se relacionará en ambos sistemas de este modo debido a ser medida con metros de longitud diferente.

Ahora, para medir la propagación como invariante, al pasar de O a O' , se puede establecer un artificio, consistente en dar a t' , en correspondencia con t , los valores precisos para obtener el resultado buscado. Una emisión de luz, que salga de O' en el momento de coincidencia de orígenes, en que $t = t' = 0$, se debe medir en cada sistema de modo que se verifique:

$$\begin{aligned}x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 &= 0 \\x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 &= 0 \\y' &= y \\z' &= z \\x^2 - c^2 t^2 &= x'^2 - c^2 t'^2\end{aligned}$$

y poniendo x' en función de x se llega a la relación:

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2)$$

La transformación (1) y (2) permite pasar del sistema fijo al móvil de modo que la propagación sea descrita de forma idéntica en ambos, a costa de representar un mismo tiempo real transcurrido por números distintos, t y t' , en cada sistema, y además medir una misma distancia espacial con metros de diferente longitud en cada sistema.

Los tiempos transformados t' pueden imaginarse como resultantes de un modo de medir diferente en O y O' . En O todas las lecturas t serían las que proporcionase un reloj normal. Si suponemos relojes que acompañen al sistema móvil, colocados en el eje x , puestos en hora cero cuando los orígenes coinciden, para que marquen la hora t' en el lugar en que se encuentren bastaría regularlos de modo que se verificase que

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

es decir que atrasasen respecto a un reloj nor-

mal uniformemente. Si suponemos ahora una serie de estos relojes ocupando en el sistema móvil lugares pertenecientes a una onda transformada (que sería métricamente esférica, pero físicamente elipsoidal, dadas las deformaciones de los metros en O'), todos esos relojes podrían imaginarse que se maniobran sus agujas para que marquen la misma hora t' cuando la luz llegue a ellos, de acuerdo con la propagación transformada. Tendríamos así todos los relojes de O' atrasando igual respecto a un reloj normal y además estando sus lecturas dislocadas unas respecto a otras de manera que establecerían en O' una simultaneidad horaria no coincidente con la física real.

Si ahora imaginamos que los metros con los que se mide en el sistema móvil son metros de longitud normal inalterable, en cualquier dirección en que coloquen, y que el orden temporal numérico establecido por los valores t' es también el que proporcionarían las lecturas de un reloj normal, es decir, si imaginamos que en O' se miden distancias y tiempos con las mismas unidades normales que en O , el resultado de todas esas suposiciones proporcionaría la imagen de una propagación física real uniforme de la luz alrededor del centro O' . Incorporar los resultados a esta imagen equivale a pensar que un mismo rayo de luz se propaga idénticamente a la vez respecto a los dos sistemas, pero que, en lugar de relacionarlos luego mediante la transformación galileana $x' = x - vt$, $t' = t$, se relacionan mediante la de Lorentz. Todo se supone medido homogéneamente en ambos sistemas, pero como hemos sacado de su lugar real en el espacio y en el tiempo las situaciones de la propagación en O' , hemos de compensarlo dislocando a la vez el modo de relacionar comparativamente esas situaciones en O y O' . Podría definirse este modo de representar las cosas diciendo que, a condición de suponer un cierto cataclismo espacio-temporal comparativo, la propagación resulta idéntica en ambos sistemas. El efecto que en el mundo físico normal ocasiona el empleo de modos de medir heterogéneos queda "sustituido" en esta imagen por una visión de disloque del propio orden espacio-temporal físico.

* * *

Las consideraciones expuestas nos acercan a la idea de la posibilidad de utilizar una ima-

gen de cálculo que permite representar las relaciones entre el sistema fundamental, en reposo, y otro móvil, partiendo indiferentemente de uno u otro, considerados alternativamente como referencia fundamental.

Si en las fórmulas de Lorentz despejamos x, t , dispondremos del doble grupo de transformaciones directas e inversas siguiente:

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ t' &= \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{aligned} \right\} \text{(D)} \quad \left. \begin{aligned} x &= \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ t &= \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{aligned} \right\} \text{(I)}$$

Se trata de considerar, ficticiamente, que O' es el sistema fundamental, en el que se mide con metros y relojes normales, y en el que la luz se propaga uniformemente. Si a la vez consideramos disfrazado a O de sistema móvil, de velocidad $-v$ respecto al O' , y que es en O donde los metros se alteran, y donde los relojes se atrasan y se manipulan para establecer una simultaneidad falsa, entonces las ecuaciones (I) representarán las relaciones entre esos dos sistemas, disfrazados de modo que cada uno adquiere la personalidad del otro.

Partir de O como sistema básico en el que la luz se propaga uniformemente en todas direcciones y se mide con unidades invariables es partir de la verdad real. Partir de O' como sistema básico es imaginar un proceso ficticio, en el que se hace representar a los valores x', t' , resultados de mediciones normales con unidades invariables. Ahora bien, un observador que midiese en O' con unidades heterogéneamente deformadas, metros más o menos largos según su situación, y relojes que atrasan y sincronizados para establecer una simultaneidad falsa y "creyese" que opera con unidades normales, establecería que su propio sistema es el fundamental, en el que la luz se propaga uniformemente de verdad, y que el sistema O es el móvil, en el que los valores x, t , se le aparecerían como lecturas dadas por instrumentos deformados. Bastaría tomar como referencia el

orden creado por los números x', t' , para que esa referencia produzca el efecto de un intercambio entre las personalidades de ambos sistemas. Las relaciones numéricas conservan su valor, pero el cambio de referencia saca a la vez de su lugar físico real a las cosas en ambos sistemas. Imágenes físicas falsas se enlazan así de manera que se conservan entre ellas las relaciones que corresponden a las dos imágenes auténticas.

Al considerar alternativamente cada sistema como referencia fundamental ocurren aparentes contradicciones. Primero los metros de O' se acortan respecto a los de O y luego se supone que son los de O los que se acortan respecto a los de O' . Primero una emisión de luz se propaga con centro en el origen O , y después esa misma emisión aparece propagándose con centro en O' . Primero medimos en O con unidades normales invariables y en O' con unidades alteradas y luego suponemos lo contrario. Pero todas estas apariencias excluyentes se explican perfectamente, dados los heterogéneos modos de representación y medición sucesivamente adoptados.

* * *

Las transformaciones de Lorentz pueden emplearse también para relacionar dos sistemas inerciales cualesquiera, móviles ambos respecto al fundamental, escamoteando aparentemente toda referencia a éste. Intentaremos presentar el procedimiento con claridad, dado el que la teoría relativista consiste en una interpretación especial de este modo de representar el enlace entre dos sistemas móviles, como después expondremos.

Para enlazar un proceso de cálculo con la realidad física se hace preciso no perder la referencia de las situaciones espaciales y temporales al sistema fundamental o en reposo absoluto. De otro modo, aunque dispongamos de relaciones verdaderas, quedará sin explicar la situación real de las cosas entre las que existen esas relaciones. Si llamamos O_f al sistema fundamental y O y O' a dos sistemas móviles, cuyas velocidades absolutas son v_f y v'_f , siendo t_f los tiempos normalmente medidos en O_f , podemos establecer lo siguiente:

Tomando como referencia un sistema móvil hemos expuesto cómo se puede disfrazar de fundamental, alterando el modo de medir lon-

gitudes y tiempos en función de su velocidad absoluta, y cómo podemos partir del orden físico ficticio creado por ese modo de medir, considerándolo como referencia fundamental. Pero en lugar de establecer las relaciones recíprocas entre cada sistema móvil y el fundamental, vamos ahora a relacionar entre sí los dos móviles, O y O' , eliminando aparentemente del juego a O_f . Veamos cómo se puede establecer este nuevo proceso.

Las dos bases a considerar alternativamente como referencias fundamentales quedan definidas así:

Base O : Deformación de mediciones en función de v_f .

Base O' : Deformación de mediciones en función de v'_f .

Utilizando estas dos situaciones se pueden escamotear v_f y v'_f , o sea, las velocidades absolutas en función de las cuales se han establecido las dos bases expuestas. La traducción matemática del proceso a imaginar ayudará a explicarlo fácilmente:

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{x_f - v_f t_f}{\sqrt{1 - \frac{v_f^2}{c^2}}} \\ t &= \frac{t_f - \frac{v_f}{c^2} x_f}{\sqrt{1 - \frac{v_f^2}{c^2}}} \end{aligned} \right\} (1)$$

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{x_f - v'_f t_f}{\sqrt{1 - \frac{v'^2_f}{c^2}}} \\ t' &= \frac{t_f - \frac{v'_f}{c^2} x_f}{\sqrt{1 - \frac{v'^2_f}{c^2}}} \end{aligned} \right\} (2)$$

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ t' &= \frac{t - \frac{v}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{aligned} \right\} (3)$$

Las ecuaciones (1) y (2) expresan la referencia de los dos sistemas móviles O y O' al fundamental O_f , en función de sus velocidades absolutas v_f y v'_f . Las ecuaciones (3) expresan la referencia del sistema O' al O , partiendo en O de un orden alterado para medir como invariante la propagación de la luz, es decir, alterado en función de v_f , para llegar en O' a valores afectados por las deformaciones Lorentz respecto a ese orden ficticio establecido en O , con lo cual quedará medida en O' la propagación también como uniforme. Ahora bien, como x , t , dependen de v_f , según la ecuación (1), la transformación (3) se puede escribir del modo siguiente:

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{x_f - \frac{v + v_f}{1 + \frac{vv_f}{c^2}} t_f}{\sqrt{1 - \frac{\left(\frac{v + v_f}{1 + \frac{vv_f}{c^2}}\right)^2}{c^2}}} \\ t' &= \frac{t_f - \frac{v + v_f}{1 + \frac{vv_f}{c^2}} x_f}{\sqrt{1 - \frac{\left(\frac{v + v_f}{1 + \frac{vv_f}{c^2}}\right)^2}{c^2}}} \end{aligned} \right\} (4)$$

$$v'_f = \frac{v + v_f}{1 + \frac{vv_f}{c^2}} \quad \left. \right\} (5)$$

Las fórmulas (3) expresan la relación entre O y O' de un modo que se refiere a su situación relativa, encubriendo la referencia a v_f , recu-

perada en (4). El sistema O representa el papel de escalón intermedio para pasar de O_f a O' . De un modo análogo, podríamos partir de O' , con valores x' , t' , deformados en función de v_f , para pasar al sistema O , lo que equivale a relacionar O con O_f , a través de O' .

De las ecuaciones (4) y (2) se deduce la (5), que relaciona velocidades heterogéneamente medidas, estando v_f y v'_f en unidades normales, cuyas lecturas acuerdan con el orden físico real, mientras que v es un número que representa una velocidad operante en el orden definido por las unidades de O , alteradas en función de v_f . Del mismo modo, $-v$ representa un número operante en el orden O' , alterado en función de v'_f . Si todas las velocidades las midiéramos homogéneamente, se verificaría que $v = v'_f - v_f$, de acuerdo con la cinemática clásica. Sólo una velocidad, la de la luz, se expresa siempre por el mismo número, c , en todos los procesos ideados, pues las fórmulas de Lorentz están precisamente construidas para obtener ese resultado, como sabemos.

Al relacionar dos sistemas móviles, O y O' , por medio de (3), se escamotea o se deja sin concretar cuál es la verdadera forma de la propagación de la luz en cada sistema y cuál es la velocidad relativa v medida normalmente. La fórmula (3) representa una relación entre O y O' , pero para interpretarla "físicamente" habremos de concretar previamente cómo son esas referencias, lo que no puede hacerse a no ser que se refieran a su vez a O_f , como sistema fundamental, en el que la luz se propaga uniformemente y las unidades de medida son invariables.

Interpretar el resultado de mediciones exige el precisar la conducta física de todo lo que en ellas interviene. Y en resumen, la utilización de la transformación (3) supone:

En el sistema O : Han de emplearse metros deformables y relojes que atrasan, en función de su velocidad absoluta v_f . Además, todos los relojes habrían de sincronizarse para que sus lecturas verifiquen la invariancia en la propagación de la luz del modo siguiente. Si desde el centro O se lanza una señal luminosa, que llega a un lugar A , y se anotan en O las lecturas de salida del rayo y de regreso del reflejado desde A , se deberá verificar que $t = 1/2 (t_1 + t_2)$. Si el reloj A no marca esa hora t cuando llega allí la luz, el observador colocado en A deberá corregir la hora, de acuerdo con las indicacio-

nes que desde O le proporcionasen. El reloj A quedaría así regulado para medir la propagación de luz bajo la forma de superficies esféricas centradas en O . Se verificaría que $t_2 - t = t - t_1$, es decir, que un rayo tarda lo mismo en recorrer el trayecto de ida que el de vuelta. Es evidente que al no ser el sistema O el fundamental o en reposo absoluto, la maniobra expuesta significa que haremos marcar la misma hora t a diversos relojes en diversos lugares en momentos no simultáneos, estableciendo una simultaneidad numérica no coincidente con la física. En un mismo momento real, los relojes de O no sólo marcarían hora distinta de la que marcara un reloj normal universal, sino que marcarían horas distintas unos respecto a otros. Numéricamente, todos los tiempos quedarían en O dislocados respecto al orden físico temporal.

En el sistema O' reproducimos el mismo proceso de manipulación de mediciones y trastrueque numérico del orden físico real, poniéndolo en condiciones de intervenir en el juego, consistente en partir de uno u otro sistema como referencia fundamental y suponer deformadas las maneras de medir en el otro de acuerdo con la transformación de Lorentz (3), en función de la velocidad relativa v . Cuando un sistema se considera relativamente al otro, sus relojes se piensan atrasando respecto a los del otro, los cuales, a su vez, se consideran atrasando respecto a los del primero cuando se toma éste como referencia. Ahora bien, los verdaderos relojes a emplear en el juego no son relojes que atrasen alternativamente en función de la velocidad relativa v . Son relojes que en O deben atrasar en función de v_f y en O' en función de v'_f , es decir, de sus velocidades absolutas. Estos relojes representan luego un doble papel en el juego de comparaciones recíprocas igualmente ficticio, siendo pensados como normales cuando el sistema en que están es referencia y como atrasando respecto a un reloj normal, en función de v , en las situaciones en que ese sistema se considera relativamente al otro.

Puede resumirse el proceso expuesto para relacionar dos sistemas móviles mediante las transformaciones de Lorentz, considerando como referencia alternativamente cada uno de ellos, estableciendo las conclusiones siguientes:

a) Empleo en cada sistema de unidades de longitud y tiempo deformadas en función de su

velocidad absoluta. Los metros se acortan más o menos según su inclinación respecto a la dirección del movimiento. Los relojes se atrasan y han de manipularse además para que sus lecturas establezcan un orden temporal ficticio.

b) Dejando en la sombra esta dependencia respecto a lo absoluto de cada modo de medir local, se piensa cada sistema como básico, imaginando que el orden físico definido por las lecturas de sus unidades es el real, con lo que la propagación aparece en forma de ondas esféricas concéntricas y esas lecturas como efectuadas con unidades normales invariables.

c) Partir de un sistema como básico significa que la propagación en el otro ha de ser imaginada medida con unidades alteradas en función de su velocidad relativa, v , respecto al primero. El valor v es un número obtenido con las unidades locales y referido al orden creado por ellas.

d) Al referir los sucesos a una u otra base, mediante las fórmulas de Lorentz, se crea un juego de apariencias contradictorias, en el que las unidades de cada sistema se presentan deformadas en función de la velocidad relativa v , cuando se refieren al orden básico del sistema ajeno y se presentan como unidades normales cuando se refieren al del propio. Cada sistema presenta un orden propio ficticio, que pierde, para situarse en el orden ajeno, mediante una supuesta deformación de sus unidades, y al recuperar su orden recobra a la vez sus unidades normales. Metros y relojes se acortan y deceleran al medir en O' , desde el punto de vista del observador de O , pero si se parte de O' son los metros y relojes de O los que se acortan y deceleran. Este aspecto contradictorio que toman los modos de medir, al referir cada sistema al orden del otro, se transforma en una imagen igualmente contradictoria si comparamos entre sí las dos situaciones básicas, en las que todo aparece medido normalmente, pero a costa de un disloque físico que hace cambiar de lugar a un mismo hecho en la sucesión temporal del universo y que un mismo rayo de luz corte con igual velocidad a dos observadores que se mueven unos respecto al otro. Pero todo este conjunto de ficciones resulta claramente explicable si se considera que está montado a partir de las situaciones definidas en el apartado a), que son perfectamente compatibles, como consecuencia del movimiento absoluto de los sistemas, no

de situaciones relativas que hagan abstracción de él.

e) El empleo de metros deformados en función de su movimiento absoluto cabe considerarlo como un efecto real de ese movimiento; es una hipótesis posible, que podrá ser o no cierta, pero que en nada altera las leyes naturales clásicas. Respecto a los modos de medir el tiempo, la conducta de los relojes, al atrasar de acuerdo con el movimiento absoluto del sistema al que acompañan, no parece lógico admitirla como hipótesis física, sino más bien como parte de un modo de medir premeditadamente elaborado. Pero, en cualquier caso, la maniobra de sincronización de todos los relojes de un sistema mediante una emisión de luz local, que sustituye el orden temporal físico por un convencional orden numérico, sería evidentemente una maniobra artificiosa, que rompe o disloca la simultaneidad real dentro de cada sistema, para acabar de proporcionarle su apariencia de referencia básica.

* * *

Aunque apenas nos hemos referido a la teoría de la relatividad, acabamos de exponer lo que de estrictamente objetivo y científico existe en ella. La teoría no constituye un descubrimiento experimental, sino una idea sobre ciertos hechos. Y esos hechos son los que hemos expuesto. La relatividad tampoco inventa ecuaciones; utiliza las de Lorentz, establecidas como un artificio de cálculo.

La teoría consiste en dos principios fundamentales:

1. Un rayo de luz se propaga con idéntica velocidad uniforme en todas direcciones y respecto a todos los sistemas en situación mutua de movimiento rectilíneo y uniforme. Principio de invariancia.

2. Las leyes físicas son invariantes para todos los observadores. Todos los cuerpos de referencia son equivalentes para establecer las leyes naturales. Principio de relatividad.

Puede observarse que si la teoría no establece cálculos nuevos tampoco en cierto modo establece nuevos principios, puesto que estaban ya establecidos con el carácter de meros artificios de cálculo. Lo nuevo de que aporta la teoría es la sugerencia de considerar el re-

sultado de ese tratamiento de cálculo como una revelación de principios o leyes naturales.

Hemos de insistir en que el problema que la teoría plantea no es de comprobación experimental. No se trata de que nos encontremos ante incomprensibles hechos reales, sino de si las hipótesis que propone son pensables con el carácter de hechos reales. Cuando algunos relativistas, ante la imposibilidad de imaginar verdades físicas coherentes acordes con los principios de la teoría concluyen admitiendo que carecen de sentido traducible en lenguaje no matemático, y que su significación depende de la lógica interna del cálculo, incurren en una inexactitud fundamental. El cálculo, por sí, posee una lógica interna puramente abstracta. Toda interpretación se basa en supuestos físicos y las mismas ecuaciones significan físicamente cosas diferentes si se interpretan a partir de supuestos diferentes, pero no significan nada físico por sí mismas. Como advirtió Santayana, "varias teorías distintas, utilizando el mismo cuerpo de fórmulas, pueden dar razón de los mismos hechos, sin que ello sea prueba de la verdad de ninguna". Las transformaciones de Lorentz no son por sí relativistas ni antirrelativistas; son sólo un instrumento matemático al servicio de unas u otras hipótesis físicas previas. Se pueden obtener, como hemos expuesto, como un artificio de cálculo y medición que partiendo del supuesto de deformación de sólidos por el movimiento absoluto, establece la forma de una transformación que permita contar la propagación de la luz como invariante en cualquier sistema móvil, mediante la representación de tiempos iguales por números distintos. Se pueden aprovechar para relacionar dos sistemas móviles como si alternativamente uno de ellos fuera fijo, eliminando aparentemente toda referencia absoluta. Por último, la teoría relativista propone el considerar como una verdad física esta situación, considerada como expresión de una ley natural.

Plantear una teoría no es justificarla, ni demostrar su verdad. Una emisión de luz debe ser descrita lo mismo en dos sistemas que se mueven uno respecto al otro. Las mediciones hechas en un sistema, expresadas en función de las coordenadas del otro, deben tener la misma forma que las inversas. Matemáticamente, estas dos condiciones plantean un problema sencillo, que conduce a las transformaciones de Lorentz, las cuales se pueden obte-

ner, además de como hemos expuesto, partiendo directamente de esas condiciones para hallar la transformación que las cumple:

$$1.^a \quad x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = 0.$$

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = 0.$$

2.^a Los valores x, y, z, t , deben expresarse por las mismas funciones lineales que los x', y', z', t' , salvo el cambio de signo de v .

Se debe verificar que:

Para $x - vt = 0$, $x' = 0$, cualquiera que sean y, z .

Para $y = 0$, $y' = 0$, cualquiera que sean x, z, t .

Para $z = 0$, $z' = 0$, cualquiera que sean x, y, t .

La relación entre y e y' debe ser idéntica a la que exista entre z y z' .

Teniendo todo esto en cuenta, la fórmula general de una transformación de coordenadas se puede simplificar, reduciéndose a la siguiente:

$$x' = bx + ht = b(x - vt) \quad x = \frac{nx' + bvt'}{bn + bvm}$$

$$y' = ay. \quad y = y'/a$$

$$z' = az. \quad z = z'/a$$

$$t' = mx + nt \quad t = \frac{bt' - mx'}{bn + bvm}$$

Para cumplirse la condición primera debe verificarse:

$$b^2(x - vt)^2 + a^2(y^2 + z^2) - c^2(mx + nt)^2 =$$

$$= k^2(x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2).$$

Siendo k una constante indeterminada, pues la condición primera se cumple para cualquier valor que se le asigne.

De la anterior expresión se deduce:

$$b^2 - c^2 m^2 = k^2, \quad a = k, \quad c^2 n^2 - b^2 v^2 = k^2 c^2,$$

$$c^2 mn - b^2 v = 0.$$

Lo que permite llegar a las fórmulas de Lorentz si se introduce la condición segunda, que exige que $k = 1$.

Este planteamiento matemático nada aclara sobre si el modo de establecer las mediciones que lo satisface es o no artificioso. Tampoco pueden invocarse como comprobación los resultados de las experiencias conocidas, Michelson-Morley, Fizeau, Fresnel, etc., que se pue-

den explicar de maneras diversas dentro de la física clásica. Una teoría, pensada en vista de las experiencias conocidas, las satisface desde luego. La única prueba a que puede someterse es, no la de si está acorde con las experiencias, sino la de si lo está consigo misma, es decir, si posee congruencia interna. No siendo sus postulados hechos observables, sino ideas, requieren ser juzgados y valorados por su virtud explicativa como tales ideas, careciendo de justificación el soslayar su aclaración, amparándose en una imposible prueba experimental, que evidencie que se trata de hechos objetivos que, aunque indescifrables, hemos de admitir como verdaderos.

En definitiva, la teoría invita a considerar como leyes naturales dos postulados cuya significación física no resulta pensable. Si una hipótesis física establece, por ejemplo, que el volumen y masa de un sólido depende de su situación de movimiento absoluto, y que un reloj atrasa si acompaña a un sistema en movimiento absoluto, el único problema que plantearía sería el de su mayor o menor utilidad en cuanto a constituir una descripción coherente de las experiencias conocidas. Pero la relatividad nos invita a admitir la idea de que se producen ciertos efectos físicos absolutos, es decir, intrínsecos a las propias cosas, y de naturaleza contradictoria e incomprensible, sin otra explicación que su dependencia de situaciones puramente relativas. Es cierto que los resultados experimentales, como afirmaba Poincaré, modelados por supuestos convencionales, sólo pueden demostrar que se ha partido de esos supuestos. Pero encajar los resultados en convenciones inteligibles no es lo mismo que encajarlos en convenciones que supongan una conducta inconcebible de las cosas físicas, como que el metro y el reloj que utiliza Pedro se acorte y se atrase respecto a los que utilizan Juan, y que sea igualmente cierto que el metro y el reloj que utiliza Juan se acorte y atrase respecto a los que emplea Pedro, y además que resulte que el movimiento relativo ocasione fenómenos tan extraños como el de trastocar el transcurso del tiempo real, de manera que hechos simultáneos en un sistema dejen de serlo vistos desde otro.

Los propios relativistas han incurrido en errores o en fantaseos al intentar explicarlo, contribuyendo a crear un ambiente de confusiónismo y de sugerencias de trascendentalidad. Es curiosa la anécdota relatada por Franck

en su libro sobre Einstein, ocurrida en casa de lord Aldane, donde el arzobispo de Canterbury preguntó al creador de la teoría qué efectos pensaba que podía tener sobre la teología. Por una parte, los relativistas nos dicen que el espacio y el tiempo no existen, y que la única realidad auténtica es la más sencilla representación de las experiencias mediante sistemas de números desprovistos de rostro intuitivo. Pero, si no existen duraciones ni distancias, ¿qué son las relaciones espaciales y temporales? Los postulados relativistas nos hablan de tamaños, movimientos, velocidades, etc., que hemos de considerar sólo como relaciones numéricas referentes a una realidad física que no posee esas cualidades que la intuición le atribuye, realidad que sólo podemos alcanzar mediante esas relaciones abstractas, pero al mismo tiempo, conscientes de la endeblez de esta posición, tratan constantemente de reforzarla aludiendo a ese despreciado mundo intuitivo. Como dice Bergson, "al amparo de los conceptos naturales se intenta practicar una transfusión de realidad a los exangües conceptos relativistas, deslizándose furtivamente en ellos lo que hay de sólido en las intuiciones normales". O, como afirma Planck, "lo relativo, reducido a sí mismo, se derrumba como un traje sin percha". Pero esa relativación de lo sensible que nos presentan los teóricos relativistas conduce a un extraño realismo, lleno de imágenes absurdas. Así, Eddington expone cómo un aviador que saliese de la Tierra con velocidad uniforme de 260 000 kilómetros/seg., encontraría que su tiempo físico transcurre dos veces y media más lentamente que el nuestro, según la opinión de un observador que quede en la Tierra. Pero respecto al aviador, sería nuestro tiempo el que transcurriría más despacio que el suyo. Al aproximarse a la velocidad de la luz, nosotros debemos admitir que su avión se contrae hasta casi anularse, mientras los desarrollos temporales se hacen tan lentos que casi se estacionan. El aviador resulta casi inmortal, aunque en forma extraplana. Pero según el propio aviador, que estaría ajeno a lo que de él suponemos, es a los que quedamos en la Tierra a los que nos ocurrirían esas mismas cosas.

Un viajero podría imaginarse acortado o envejecido, respecto a los que quedasen en el sistema fundamental o en reposo, a consecuencia de su movimiento absoluto. Pero imaginar efectos absolutos a consecuencia de situacio-

nes puramente relativas carece de sentido. Entretenerse en pensar que unos artificios de cálculo y medición se convierten en leyes físicas fantásticas, y admirarse después ante esas sorprendentes consecuencias, viene a ser como si un prestidigitador se asombrase al conseguir que una paloma aparezca debajo de un sombrero. Llamar leyes de la naturaleza al resultado de un manejo artificioso puede constituir una nueva semántica, pero no una nueva explicación sobre cómo es lo físico realmente. El ilusionista tiene como antecedente al mago, que presenta el resultado del juego como verdad natural. Pero, como dice Gabriel Marcel, "el menosprecio de la razón y del buen sentido son también características de nuestro tiempo". El filósofo Jaspers nos recuerda también que "el hombre sigue tendiendo a dejarse seducir por la aparente profundidad de lo irracional, llena de misteriosas sugerencias nunca cumplidas".

* * *

Hemos de finalizar este estudio insistiendo en las conclusiones deducibles de los hechos considerados. No se trata de negar el resultado del juego relativista, sino de contemplar racionalmente en qué consiste el proceso de ese juego, lo cual elude o escamotea la teoría. No se puede llamar realidad al resultado de un truco que presenta las cosas de un modo insólito, cuando es fácil imaginar en qué consiste ese truco.

¿Qué hace falta para que se verifiquen los postulados de la relatividad? Como hemos expuesto bastaría lo siguiente:

1.º *Hipótesis física.* — Que en cada sistema se utilicen metros y relojes que se alteren en función de su movimiento absoluto.

2.º *Artificio.* — Que los relojes de cada sistema se maniobren según la regla antes expuesta, utilizando una emisión de luz local, creando así una ordenación numérica del tiempo que coincidirá con la física sólo si el sistema de que se trata es el fundamental, pero no si se trata de otro sistema móvil respecto al fundamental.

Preparado así el juego, el observador de cada sistema podría representar los hechos como si se cumplieran los dos postulados de

la teoría, considerándose asimismo como referencia fundamental en la que se cumple el principio de invariancia de la velocidad de la luz midiendo con unidades que supone normales, y relacionándose con cualquier otro sistema por medio de las transformaciones de Lorentz. Cada observador puede reproducir desde su sistema una imagen del mundo físico análoga a la que formen desde sus sistemas los observadores ajenos. Pero nada de esto tiene que ver con descubrimientos sobre la verdadera forma de lo real físico. La teoría puede definirse como un método para relacionar los sistemas a base de situaciones relativas, que permite escamotear las absolutas, lo que no significa que se pueda prescindir de éstas cuando se trate de puntualizar la verdadera situación física de cada sistema y la verdadera forma de los fenómenos respecto a cada sistema. La teoría no proporciona nuevas aclaraciones acerca de lo físico que contradigan a las basadas en los fundamentos clásicos. La única hipótesis que exige consiste en suponer que los metros y los relojes se deforman a causa de su movimiento absoluto, suposición que no altera las intuiciones normales sobre el espacio y el tiempo. La teoría, en resumen, se presenta como un capítulo de la física clásica, consistente en un modo de utilizar ciertas transformaciones mediante ciertos procedimientos de medición, pero sus postulados carecen de consistencia si se quieren interpretar como leyes naturales. Son artificios disfrazados de principios y no pueden ser otra cosa. Pero es importante observar que el modo de representación relativista no sólo puede emplearse sin hacer alusión a lo absoluto, sino incluso ignorando cuál es la situación absoluta de los sistemas que se relacionan. Bastaría que la hipótesis de acortamiento de metros y deceleración de relojes a causa del movimiento absoluto fuese cierta, para que operase por sí misma en el sentido de proporcionar mediciones acordes con los principios relativistas, sin otra maniobra de los observadores que la de sincronizar sus relojes mediante una emisión de luz local, estableciendo así una definición de simultaneidad acorde con esa maniobra. Entonces, cada observador se podría considerar como situado en el sistema fundamental con la misma justificación que cualquier otro, pero todos, menos uno, partirían de una definición artificiosa de su situación temporal física.