

Apéndices explicativos a *Espacio y Tiempo en la Física actual* de Moritz Schlick*

Manuel García Morente

Apéndice I

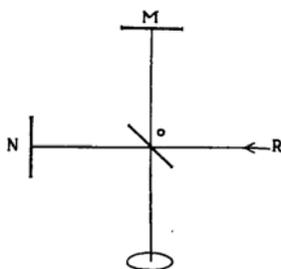
EXPERIMENTO DE MICHELSON Y MORLEY

Este experimento pretende poner de manifiesto la existencia del éter inmóvil, o lo que es lo mismo, el movimiento absoluto de la tierra. En efecto: si el éter está en completo reposo, el movimiento de la tierra con respecto a él se podrá observar de la siguiente manera:

La luz se propaga en el éter —que se supone inmóvil— con una velocidad de 300.000 kilómetros por segundo. Esa propagación se efectúa por ondas electromagnéticas, comparables groseramente a las que se producen cuando se arroja una piedra en el agua. Si un cuerpo se mueve en el éter, yendo al encuentro de la onda luminosa, es evidente que la onda luminosa alcanzará al cuerpo *más pronto* que si el cuerpo se mueve alejándose de ella. Dos amigos que marchan uno hacia el otro, se encontrarán más pronto que si el uno va tras el otro. Sea q la velocidad de la tierra en el éter inmóvil. Sea c la velocidad de la luz en el éter inmóvil. Pues bien: cuando la tierra vaya en dirección hacia el rayo luminoso, éste llegará más pronto a la tierra; su velocidad será mayor; será $c + q$. Y en el caso contrario el rayo luminoso llegará más tarde a la tierra; su velocidad será menor; será $c - q$.

¿Es posible apreciar esta diferencia? Lo es; y el experimento de *Michelson* y *Morley* está dispuesto admirablemente para registrarla. Sean dos espejos en posición perpendicular uno al otro. Los llamaremos M y N (fig. 1.^a).

Ambos espejos están fijos, unidos uno a otro, de manera que pueden cambiar de posición, pero permanecen siempre en dirección perpendicular. En el punto O, donde se cruzan las dos perpendiculares sobre los dos espejos, se ha colocado una lámina de vidrio semitransparente y semirreflectora. Esta lámina forma un ángulo de 45° con las perpendiculares sobre M y N. Un rayo luminoso R hierde la lámina en el punto O; una parte de ese rayo es despedido hacia M y, reflejado por el espejo, vuelve a O; otra parte del rayo R atraviesa

FIGURA 1.^a

la lámina, llega a N y, reflejado por el espejo, vuelve a O. Una lente dirigida sobre el punto O de la lámina permite al observador examinar las interferencias que se produzcan al reunirse en O los dos rayos luminosos: el que ha hecho el viaje de ida y vuelta a M y el que ha hecho el viaje de ida y vuelta a N. Las interferencias de dos rayos luminosos son ciertos fenómenos ópticos que se producen cuando, al encontrarse las ondas luminosas, no coinciden las ondulaciones exactamente.

Este aparato así dispuesto, se ve claramente que los rayos luminosos oriundos de R recorren las mismas distancias, puesto que OM es igual a ON. Coloquemos el aparato de manera que la dirección OM sea paralela a la dirección del movimiento de la tierra con respecto al éter. ¿Qué sucederá? Sucederá que el rayo luminoso que va de O a M y vuelve de M a O, como quiera que esa es la dirección del movimiento de la tierra con respecto al éter —medio inmóvil en donde se propaga la luz—, hará su recorrido en tiempo distinto que el otro rayo que va de O a N y de N a O. Esa diferencia de velocidad podrá calcularse de antemano sabiendo que la velocidad de la luz es de 300.000 kilómetros por segundo y la de la tierra de 30 kilómetros por segundo. Las rayas de interferencia deberán, pues, correrse, disponiendo bien el experimento, en una medida muy apreciable: unas 0,56 de anchura de franja. Pues bien: a pesar de esto, *nunca se advirtió corrimiento alguno en las rayas de interferencia*. El rayo luminoso se propaga siempre con igual velocidad en todas las direcciones. El experimento de *Michelson* dio un resultado negativo.

¿Cómo interpretar este resultado? No hay más que estas dos maneras: o conservar la hipótesis del éter inmóvil, y entonces hay que suponer que los cuerpos se contraen en la dirección de su movimiento con respecto al éter, y que esa contracción es tanto mayor cuanto mayor sea su velocidad con respecto al éter (la contracción de *Lorentz* es $\sqrt{1 - v^2/c^2}$), o bien rechazar la hipótesis del éter inmóvil, y con ella la del movimiento absoluto. Y entonces afirmar la relatividad *física*; esto hizo *Einstein*. En este caso, la contracción de Lorentz no es otra cosa sino la obligada diferencia de metros y tiempos,

que se verifica en dos sistemas cualesquiera de referencia, como se explicará en los Apéndices siguientes.

APÉNDICE II

SOBRE LA RELATIVIDAD DEL TIEMPO

Imaginése un sistema en reposo, que designaremos con la letra K. Este sistema puede ser, por ejemplo, la vía de un ferrocarril en línea recta.

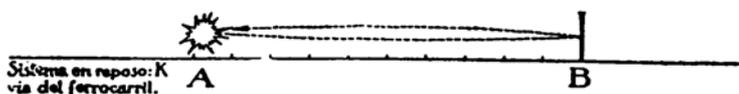


FIGURA 2.^a

Imaginemos en K dos puntos A y B, separados por una distancia de 100 metros. Supongamos en B un espejo vuelto hacia A. En el punto A sitúase un observador provisto de un reloj. A las doce en punto prodúcese en A un relámpago, cuya luz llega a B, es reflejada por el espejo y regresa a A. Entre el momento en que la luz sale de A (las doce en punto) y el momento en que regresa a A transcurren en el reloj del observador veinte segundos. Por lo tanto, la luz tarda diez segundos en recorrer la distancia AB, y otros diez segundos en recorrer la misma distancia en sentido inverso BA. Un observador, provisto de otro reloj, se sitúa en B, suprime el espejo y se repite la experiencia. A las doce en punto parte de A el relámpago; el observador situado en B, al ver el relámpago, pone su reloj en las doce más diez segundos. Ya están los dos relojes perfectamente regulados; marchan isócronos. (No hay que decir que, para la claridad de la demostración, estamos suponiendo una velocidad de la luz infinitamente más pequeña de lo que es en la realidad.)

Supongamos ahora que por la vía del ferrocarril pasa un tren larguísimo, que se mueve con movimiento uniforme y con la velocidad de un metro por segundo. Designaremos el tren por la recta K'. La dirección de su movimiento esta indicada por la flecha (fig. 3^o).

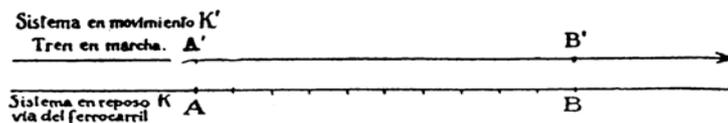


FIGURA 3.^a

En el tren, o sea en la recta K' , definimos dos puntos A' y B' , que están a 100 metros de distancia uno de otro, como B de A.

Es bien claro que podemos a voluntad considerar K como inmóvil, en cuyo caso K' está en movimiento; o también K como en movimiento, en cuyo caso K' está inmóvil. Dicho de otro modo: el viajero, en el tren, puede considerar, si quiere, que el tren está inmóvil, y que es la vía y la tierra la que se mueve huyendo hacia atrás; como el pastor que está junto a la vía considera que es ésta la que está inmóvil y el tren el que se mueve. Es, pues, posible, en el interior del tren, verificar el arreglo de los relojes en los puntos $A'B'$ de la misma manera, exactamente, que se verificó el de los relojes en los puntos A y B.

Una vez hechos estos arreglos, supongamos que, al pasar el tren por la vía, en el instante en que el punto A' del tren coincide con el punto A de la vía, se produce, en el lugar de esa coincidencia, un relámpago. En este momento, los relojes de A y de A' marcan los dos las doce en punto. El relámpago llega al punto B de la vía, y el observador situado en él observa en su reloj las doce y diez segundos. Pero en este mismo instante el relámpago *no ha llegado aún al punto* B' del tren, porque, como el tren se mueve a razón de un metro por segundo, resulta que, cuando el relámpago llega al punto B de la vía, ya el punto B' del tren ha rebasado la posición del punto B de la vía y se encuentra 10 metros más allá, en B'' (fig. 4.^a).

Luego el relámpago tarda un segundo más en llegar al punto B' del tren (que ahora ocupa la posición B'') que en llegar al punto B de la vía. Cuando el relámpago llega al punto B' del tren (que ahora ocupa la posición B''), el reloj del observador situado en el punto B de la vía señala las 12 + 11 segundos. Pero el reloj del observador situado en el punto B' del tren (ahora en B'')

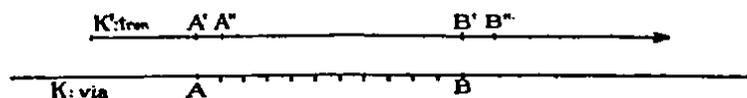


FIGURA 4.^a

señala las 12 + 10 segundos, de conformidad con el arreglo establecido previamente con el reloj del observador situado en el punto A' del tren (ahora A''). Luego once segundos de los relojes de la vía equivalen a diez segundos de los relojes del tren. El tiempo de un mismo suceso es diferente si lo medimos desde el tren que si lo medimos desde la vía. Cien metros separan los puntos de la vía A y B; cien metros asimismo separan los puntos del tren $A'B'$. Sin embargo los relojes de la vía, los 100 metros entre $A'B'$ del tren han sido recorridos en once segundos, mientras que, para los relojes del tren, esos mismos 100 metros de tren que hay entre A' y B' han sido recorridos en diez segundos. El tiempo del tren no vale, pues, lo mismo que el tiempo de la

vía, el tiempo del tren es más lento que el tiempo de la vía. Los relojes del tren andan más despacio que los relojes de la vía. El tiempo no es, pues, *absoluto*, sino que cada sistema de referencia tiene su tiempo. El tiempo es un concepto relativo que depende del sistema de referencia desde donde se mida la duración del suceso.

APÉNDICE III

SOBRE LA RELATIVIDAD DE LA SIMULTANEIDAD

Por lo dicho en el Apéndice II se ve claramente que el concepto de simultaneidad es relativo, puesto que lo es el de tiempo. Dos sucesos que son simultáneos cuando se observan desde un sistema de referencia, no son simultáneos cuando se observan desde otro sistema. Esto lo pone de manifiesto *Einstein* en su librito *La teoría de la relatividad*, de la siguiente manera:

“Para comprobar la simultaneidad de dos sucesos puede emplearse el siguiente procedimiento: Sean dos relámpagos que se producen en A y B al mismo tiempo (fig. 5.^a). Se medirá la distancia AB a lo largo de la vía (la cosa sucede en una vía del ferrocarril), y en el centro M se instalará un observador provisto de un aparato, por ejemplo, dos espejos inclinados a 90°, que le permita observar a la vez los puntos A y B. Si el observador percibe los dos relámpagos al mismo tiempo, son éstos entonces simultáneos.

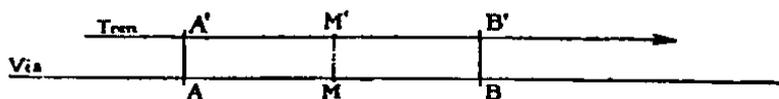


FIGURA 5.^a

Pero supongamos ahora que sobre la vía anda un tren larguísimo, con la velocidad v , en la dirección señalada en la figura 5.^a. Los viajeros del tren preferirán considerar el tren como sistema de referencia (sistema de coordenadas), y todos los sucesos los determinarán con respecto al tren. Un suceso cualquiera que acontece en un punto de la vía, acontece también en un punto determinado del tren. La definición de la simultaneidad es la misma con respecto al tren que con respecto a la vía. Pero entonces se plantea el problema siguiente: dos sucesos —por ejemplo, los dos relámpagos A y B— que son simultáneos *en la vía*, ¿son también simultáneos en el tren? Vamos a demostrar en seguida que la respuesta es negativa.

Al decir que los dos relámpagos A y B son simultáneos en la vía queremos decir que los rayos luminosos oriundos de los puntos A y B se encuentran en el centro M de la distancia AB, contada en la vía. Pero a los sucesos A y B corresponden en el tren los puntos A' y B'. Supongamos que M' sea el centro de la distancia A'B' en el tren en marcha. Este punto M' coincide con el punto M en el instante en que se producen los relámpagos (instante computado con relación a la vía); pero luego se desplaza hacia la derecha en el dibujo con la velocidad v , que es la velocidad del tren. Si un observador situado en el tren en M' no fuera arrastrado por el movimiento del tren con la velocidad v , permanecería constantemente en M (M Y M' coincidirían constantemente), y los rayos luminosos oriundos de A y B le alcanzarían simultáneamente, es decir, que estos rayos luminosos se cruzarían justamente donde él está. Pero, en realidad, el observador en M' se mueve (con relación a la vía) y marcha al encuentro de la luz que viene de B, mientras que se aleja de la luz que viene de A. El observador en M', en el tren, verá, pues, el relámpago de B antes que el de A, y llegará a la conclusión de que el relámpago B ha sido anterior al relámpago A. Así, pues, sucesos que son simultáneos en la vía no lo son en el tren, y recíprocamente.”

La explicación de Einstein es un modelo de sencilla claridad. La simultaneidad de dos sucesos es un concepto relativo; depende del sistema de referencia que se elija.

APÉNDICE IV

SOBRE LA RELATIVIDAD DE LA DISTANCIA O DE LA EXTENSIÓN

En la medición de una longitud en reposo no entra para nada el factor tiempo. Basta elegir un metro y superponerlo a la longitud el número de veces necesario. Pero si la longitud, o distancia entre dos puntos de un cuerpo rígido, se halla en movimiento, y hay que medirla desde un sistema en reposo, entonces ya no es posible emplear ese método. Tiene que intervenir la noción de tiempo y la noción de simultaneidad, las cuales (Apéndices II y III) son relativas y dependen de la velocidad del sistema. Recuérdese lo dicho en el Apéndice II. Rememórese la figura 4.^a En virtud de la relatividad de la simultaneidad (Apéndice III), no es posible que coincidan dos a dos *cuatro* puntos, extremidades de dos distancias iguales, si dos de ellos pertenecen a un sistema en movimiento y los otros dos a un sistema en reposo. Si coincidieran los cuatro puntos dos a dos, ello sería señal de que, o los dos sistemas están ambos en reposo (es decir, son uno y el mismo sistema), o los dos sistemas están ambos en movimiento uniforme rectilíneo de igual velocidad (es decir, son uno y el mismo sistema). Si mido, pues, A'B' del tren en marcha,

desde la vía, podré apreciar la coincidencia de dos puntos, por ejemplo, de B' con B; pero no podré apreciar la coincidencia de A' con A. A' se habrá corrido un poco hacia A. La distancia A'B' en el tren no es la misma que la distancia AB en la vía. Los metros, en el tren, son más cortos que en la vía; como los relojes del tren, son más lentos que los de la vía. La longitud, como el tiempo, es un concepto relativo que depende del sistema de referencia desde donde se mida. Llámase *contracción de Lorentz* al acortamiento que sufre un cuerpo en movimiento con respecto a un sistema de referencia en reposo. La *contracción de Lorentz* es de $1/\sqrt{1 - q^2/c^2}$ en donde q designa la velocidad del cuerpo y c la de la luz, que es constante.

Apéndice V

SOBRE LA MASA DE LA ENERGÍA

Examinemos las consecuencias del principio especial de la relatividad. Según este principio, un cuerpo en movimiento está sometido a la *contracción de Lorentz*. Ya sabemos que esta *contracción de Lorentz* no es una hipótesis física especial, sino una consecuencia necesaria de la relatividad de todos los movimientos uniformes rectilíneos. La *contracción de Lorentz* se expresa por la fórmula $1/\sqrt{1 - q^2/c^2}$, donde q es la velocidad del cuerpo y c la de la luz. Es decir, que el cuerpo pierde la $\sqrt{1 - q^2/c^2}$ ésimas partes de su longitud. Sabemos que c es constante. Por lo tanto, la expresión $\sqrt{1 - q^2/c^2}$ es una cantidad que aumenta y disminuye con q . Si la velocidad del cuerpo aumenta, también aumentará la *contracción*, es decir, disminuirá más la longitud del cuerpo. Si la velocidad del cuerpo llegare a ser igual a la velocidad de la luz, tendríamos entonces $q^2/c^2 = 1$, y la *contracción de Lorentz* alcanzaría la total longitud del cuerpo; esto es, que un cuerpo arrastrado con la misma velocidad de la luz se haría plano, pues perdería una de sus dimensiones.

Refiérase el lector a la figura 3.^a (Apéndice II). Supongamos que el tren se mueve con la velocidad de la luz; resultaría entonces que el relámpago producido en A y A' necesitaría, para llegar a B', que no hubiese distancia alguna entre A' y B' —es decir, que A' y B' coincidiesen—; pues si hubiere alguna distancia entre A' y B', y el tren se moviese con la velocidad de la luz, faltaría siempre esa distancia para que la luz llegase a B', esto es, que no llegaría nunca la luz a B'. Se ve bien que la velocidad de la luz es un límite máximo de las velocidades físicas.

Por otra parte, según la teoría de la relatividad, no es exacta la *ley de Galileo* sobre la composición de las velocidades. Dos velocidades, q y q' , de igual sentido y dirección, no se adicionan, como quería *Galileo*, sino que la composición de ambas resulta algo menor que su suma. De donde resulta que

no puede haber acción instantánea a distancia. Esta imposibilidad obliga, pues, a atribuir a la energía radiante cierta cantidad de movimiento y, por consiguiente, cierta masa, puesto que la cantidad de movimiento es el producto de la masa por la velocidad. *La energía radiante posee, pues, una masa.*

Pero el principio de la equivalencia de la masa inerte y la masa pesada (páginas 61 y 62¹ y Apéndice VII) nos obliga a afirmar que si la energía es inerte, esto es, si tiene masa, es también pesada en proporción, es decir, está sometida a las acciones de los campos gravitatorios. Esto es el origen de una de las más hermosas comprobaciones de la teoría de la relatividad (página 88² y Apéndice X).

NOTAS

* Publicado en M. Schlick, *Espacio y Tiempo en la Física actual. Introducción para facilitar la inteligencia de la teoría de la relatividad y de la gravitación*. Traducido de la tercera edición alemana por Manuel G. Morente, con once apéndices explicativos. Madrid, Calpe.1921. El traductor incluye la siguiente “Advertencia”: “El traductor ha añadido al texto once Apéndices explicativos que cree facilitarán al lector la comprensión de este librito. Ruega al lector que, cuando encuentre una llamada de referencia a un Apéndice, no prosiga la lectura del texto sin tomar conocimiento del Apéndice. Ésta es la única manera de hacer provechosa la lectura para quien no esté muy familiarizado con los problemas aquí tratados”.

teorema quiere agradecer a los HEREDEROS DE MANUEL GARCÍA MORENTE, así como a los editores de sus *Obras Completas*, JUAN MIGUEL PALACIOS y ROGELIO ROVIRA, su amable permiso para reproducir aquí estos textos. Estos “apéndices explicativos” están tomados de GARCÍA MORENTE, M., *Obras completas*, edición de Juan Miguel Palacios y Rogelio Rovira, Barcelona, Anthropolos; Madrid, Fundación Caja de Madrid, 1996, tomo II, pp. 672-9.

¹ De la traducción del libro de Moritz Schlick *Espacio y Tiempo en la Física actual. Introducción para facilitar la inteligencia de la teoría de la relatividad y de la gravitación*, Madrid, Calpe, 1921. Se lee allí: “La conexión que existe entre la gravitación y la inercia la ha expuesto imaginativamente Einstein por modo clarísimo como sigue: Supongamos que en cierto lugar del universo hállase un físico metido en un cajón cerrado, y este físico observa que todos los objetos abandonados a sí mismos adquieren una determinada aceleración, que es, por ejemplo, caer todos en el suelo de la caja con una aceleración constante. Nuestro físico encajonado podría explicarse este fenómeno de dos maneras: primero, admitiendo que el cajón yace inmóvil en un astro o cuerpo celeste, y refiriendo la caída de los objetos en él al influjo de la gravitación de ese astro; segundo, admitiendo que el cajón se mueve hacia “arriba” con una aceleración constante, y, en este caso, la caída de los objetos se explicaría por su inercia. Ambas explicaciones son igualmente posibles, y nuestro físico no posee medio alguno para decidir entre ellas. Si se admite que todas las aceleraciones son relativas, esto es, que falta, en principio, todo medio de diferenciación, entonces puede esto generalizarse diciendo que cuando en un punto cualquiera del universo se observa la aceleración de un cuerpo abandonado a sí mismo, puede concebirse ésta, o bien como efecto de la inercia, o bien como efecto de la gravitación. De otro modo expresado, cabe optar entre decir: “el sistema de referencia desde el cual observo el proceso está en movimien-

to acelerado”, o decir “el proceso se verifica en un campo gravitatorio”. La identidad de valor de ambas concepciones la designaremos, siguiendo a *Einstein*, con el nombre de *principio de la equivalencia*, el cual descansa, como ya hemos dicho, en la identidad de masa inerte y masa gravitante”. (*N. del E.*)

² De la citada traducción de la obra de Schlick. Se lee allí: “El segundo efecto, la torcedura del rayo luminoso por la gravitación, ha sido observado con certeza en el año 1919, con ocasión del eclipse de sol del 29 de mayo. La luz de una estrella que, camino de la Tierra, pase muy cerca del Sol será desviada, en efecto, por el fuerte campo gravitatorio, y esta desviación se manifestará en un aparente desplazamiento de la estrella. Ahora bien: las estrellas que se encuentran en la proximidad del sol no son visibles para nosotros —o para la placa fotográfica— nada más que durante un eclipse; había que esperar a que llegara uno para comprobar esta consecuencia de la teoría. De Inglaterra fueron enviadas dos expediciones para observar el eclipse y ambas consiguieron determinar que, en efecto, se verificaba la aparente desviación predicha por Einstein y ello en la cantidad que calculó de antemano.” (*N. del E.*)