



La reinterpretación radical del experimento de Michelson-Morley por la relatividad especial

Alejandro CASSINI
Leonardo LEVINAS



RESUMEN

Pretendemos dilucidar de qué manera diferentes presupuestos teóricos producen interpretaciones radicalmente distintas de los resultados de un mismo experimento. Para ello analizamos la relatividad especial tal como fuera formulada por Einstein en 1905 y estudiamos su singular relación con los resultados del experimento de Michelson y Morley de 1887. Mostramos cómo en diversos contextos históricos es posible que un mismo experimento pueda ser enmarcado en conceptualizaciones diferentes, muchas veces incompatibles entre sí, de los fenómenos. Ello nos permite mostrar por qué la relatividad especial se impuso sobre las teorías rivales al haber hecho posible una reinterpretación de dicho experimento y ponerlo en relación con un fenómeno novedoso – la invariancia de la velocidad de la luz – que no había sido originalmente investigado. Además, nos permite responder a la pregunta acerca de cómo este experimento hubiese sido interpretado en contextos tan diferentes como el propio de la ciencia en el siglo XVII donde el movimiento de la Tierra era todavía una hipótesis cuestionable.

PALABRAS-CLAVE • Experimento de Michelson-Morley. Postulados de la relatividad especial. Contexto histórico del experimento. Presupuestos e hipótesis auxiliares.

El célebre experimento de Michelson y Morley (en adelante: experimento *M-M*) realizado en 1887 se asocia habitualmente con el ocaso de la teoría del éter y con el surgimiento de la teoría especial de la relatividad. Un libro de texto sobre física de partículas elementales ofrece, por ejemplo, esta descripción:

El experimento proporcionó una clara prueba de que no existe ningún éter y de que la velocidad de la luz es constante independientemente del movimiento de la fuente (Coughlan and Dodd, 1991, p. 9).

Otro texto, esta vez de cosmología, afirma lo siguiente:

En 1887, Albert Michelson y Edward Morley hallaron que la velocidad de la luz es la misma en todas direcciones sobre la superficie de la Tierra (Harrison, 2000, p. 206).

Incluso en uno de los mejores textos avanzados sobre relatividad podemos leer que:

[...] la experiencia confirma enteramente el principio de relatividad. Son justamente las mediciones, realizadas por primera vez por Michelson (1881), las que han revelado la completa independencia de la velocidad de la luz respecto de la dirección de su propagación (Landau & Lifchitz, 1970, p. 11).

Finalmente, un libro divulgativo, pero escrito por un especialista eminente en relatividad, presenta el resultado del experimento en estos términos:

[...] en 1887 Michelson y Morley realizaron su famoso experimento, preparado para determinar con gran precisión el cambio de la velocidad medida de la luz debido al movimiento del observador a través del éter. No encontraron cambio alguno. Como consecuencia de ese experimento se descartó la teoría del éter y fue confirmado el principio de relatividad (Wald, 1992, p. 31).

Estas citas, elegidas casi al azar, podrían multiplicarse fácilmente. Todas ellas ofrecen típicas interpretaciones retrospectivas del resultado del experimento *M-M* hechas a la luz de la teoría de la relatividad especial, teoría que sólo se formuló dieciocho años después. En el momento en que se hizo este experimento no se lo interpretó en términos que pudieran tener, en principio, alguna relación directa con la relatividad; el propio contexto histórico de la física teórica no permitía hacer esta clase de interpretación. En los años inmediatamente posteriores al experimento *M-M*, no se tendía a extraer la conclusión de que el éter no existía, ni tampoco de que la velocidad de la luz era constante a pesar de que la fuente luminosa estuviera en movimiento respecto del éter. Nadie pensó, además, que confirmara el principio de relatividad, la equivalencia de todos los referenciales inerciales para la descripción de los fenómenos electromagnéticos. Tampoco la hipótesis de que la velocidad de la luz era invariante, es decir, la misma en cualquier referencial inercial.¹ ¿Qué es exactamente lo que este experimento

¹ Adviértase que los pasajes citados no coinciden acerca de cuál es la hipótesis que el experimento *M-M* confirma, si es el principio de relatividad (el primer postulado de Einstein) o el de la constancia de la velocidad de la luz (el segundo postulado de Einstein). Más adelante volveremos sobre este punto.

confirmó o refutó? Esta es una pregunta muy simple, pero su respuesta es extremadamente compleja y no admite una formulación tajante como las que acabamos de citar. Trataremos de elucidarla en el resto de este trabajo. Para ello, será necesario examinar con cierto detalle la naturaleza de los presupuestos, explícitos o implícitos, que operan en todo experimento y el papel que ellos desempeñan en la interpretación de los resultados.

La estructura de nuestro trabajo es la siguiente: en la sección 1 presentamos las dificultades conceptuales y las incongruencias que consideramos más importantes suscitadas por la postulación de la existencia de un éter luminífero como medio indispensable para la propagación de las ondas luminosas, antes de que Michelson comenzara sus experimentos en 1881. En 2 formulamos, en una breve retrospectiva histórica, los problemas más importantes planteados en torno al movimiento de la luz y de los cuerpos en un supuesto éter, y al estado dinámico del propio éter. En la sección 3 describimos el experimento *M-M* de 1887 y analizamos críticamente algunos de sus presupuestos. En 4 discutimos dos interpretaciones completamente diferentes del experimento, la de los propios Michelson y Morley y la de Lorentz, y mostramos que, de hecho, conducen a dos concepciones diferentes tanto del carácter del movimiento como de la naturaleza de los cuerpos, lo cual conmueve directamente a la mecánica newtoniana. En 5 presentamos los postulados de la teoría de la relatividad especial de manera tal que su formulación de 1905 pueda entenderse como independiente del resultado del experimento *M-M* y de cualquiera de sus interpretaciones disponibles hasta ese momento. Hacemos hincapié en el hecho de que si bien en su formulación original se prescinde de la existencia del éter, la relatividad especial no implica que éste no exista; incluso Einstein vuelve a introducirlo en el contexto de la relatividad general. En 6 analizamos las interpretaciones del experimento *M-M* después de 1905 y discutimos cómo una nueva interpretación lo convierte en decisivo respecto de un fenómeno (la invariancia de la velocidad de la luz) que no fue el originalmente investigado. Enfatizamos los diferentes papeles que este experimento desempeñó en los contextos de descubrimiento y de justificación de la relatividad especial. En las conclusiones (sección 7) determinamos, analizando algunos ejemplos notables, la importancia de los contextos históricos y de los correspondientes presupuestos que operaron en el desarrollo del problema de la medición de la velocidad de la luz, con vistas a establecer las razones por las cuales la relatividad especial, a pesar de resultar una teoría tan poco intuitiva, se impuso sobre otras teorías rivales.

I LA LUZ Y EL ÉTER

Durante la primera mitad del siglo XIX, la teoría ondulatoria de la luz resultaba aparentemente bien confirmada por los experimentos de difracción e interferencia realizados por Young, Fresnel y otros. Tal como estos experimentos eran interpretados, la teoría ondulatoria de la luz proporcionaba una explicación de los fenómenos que las teorías corpusculares no podían ofrecer. La luz se concebía como una oscilación con una velocidad de propagación del orden de los 300.000 km/s, de acuerdo con las mediciones realizadas por Fizeau en 1849. Ahora bien, las ondas de tipo mecánico, como el sonido o las olas, consisten en la vibración de un medio material, por ejemplo el aire o el agua. Sin embargo, la luz, a diferencia del sonido, podía propagarse por el espacio interestelar, aparentemente vacío. Una forma de resolver este problema era suponer que el espacio no estaba vacío sino ocupado por una materia muy sutil que se denominó éter luminífero. Evidentemente, el éter luminífero se concibió como una suerte de materialización del espacio absoluto requerido por Newton: continuo, homogéneo e isótropo. El éter debía penetrar la materia si acaso ésta se hallaba compuesta de corpúsculos o partículas (impenetrables entre sí); podía hacerlo porque, de hecho, era otro tipo de materia. El éter parecía tener, entonces, tanto características del vacío como de la materia. Del vacío, la carencia de masa, la falta de resistencia al movimiento y una densidad nula; de la materia, la elasticidad y la capacidad de oscilar o vibrar.

Ahora bien, debemos notar que, de hecho, el sonido se propaga en un medio microscópicamente discontinuo, lo cual es diferente del caso de la luz en un “vacío” que debía estar lleno de un éter verdaderamente continuo: si el éter no fuese continuo, por más que la discontinuidad fuese muy pequeña, entonces, no se necesitaría de él en absoluto como soporte de la onda mecánica. O sea, si la luz no pudiera propagarse por el espacio interestelar vacío, entonces, tampoco podría hacerlo por el espacio vacío entre los átomos de materia (por ejemplo, entre las moléculas del agua). Parece entonces razonable la identificación del éter con el espacio. Desde este punto de vista, resulta incluso más difícil explicar cómo pueden propagarse otras ondas mecánicas, como el sonido, en un medio discontinuo como el aire.

En la década de 1860, Maxwell, apoyándose en ideas cualitativas de Faraday, elaboró una teoría matemática que unificaba los fenómenos hasta entonces conocidos acerca de la electricidad y el magnetismo.² Maxwell también postuló la existencia de una especie de éter como soporte de las ondas electromagnéticas. En las ecuaciones de

² En este párrafo y el siguiente ofrecemos sólo un esbozo muy general del contexto de la óptica y el electromagnetismo en el que Michelson y Morley realizaron su experimento. La obra de Born (1962), Caps. 4 y 5, contiene una exposición detallada de las teorías ópticas y electrodinámicas del siglo XIX. Balibar (1992) comenta el punto de vista de Einstein sobre dichas teorías.

Maxwell aparece una constante c que representa la velocidad de propagación de estas ondas, que resultan transversales, esto es, su dirección de propagación es perpendicular al plano de oscilación de los campos eléctrico y magnético. Ya en 1817 Fresnel había propuesto la hipótesis de que la luz consistía en ondas transversales y, desde entonces, dicha hipótesis se aceptó como la única explicación posible del fenómeno de la polarización de la luz. Por otra parte, el cálculo de la constante c sobre la base de las ecuaciones de Maxwell mostraba que ésta tenía un valor casi idéntico al de la velocidad de la luz tal como había sido empíricamente determinado. Sobre la base de estas coincidencias, Maxwell conjeturó que la luz no era otra cosa que un tipo especial de onda electromagnética.

La conjetura de Maxwell resultó confirmada por los experimentos que Hertz realizó en 1888 con ondas de radio. Hertz comprobó que esta clase de ondas producía reflexión, refracción, interferencia y polarización, tal como las ondas luminosas. Además, conociendo la frecuencia de las ondas de radio producidas, pudo calcular su longitud y, en consecuencia, su velocidad de propagación, que resultaba igual a la de la luz. En razón de estos hechos, Hertz consideró que la conjetura de Maxwell era correcta y, desde ese momento, la comunidad de los físicos aceptó que la luz era una onda electromagnética. La óptica quedó así integrada al electromagnetismo y el éter lumínico se identificó con el éter electromagnético.

Si bien la teoría del campo electromagnético requería la existencia del éter como un medio continuo en el cual se propagaban las ondas, no determinaba, sin embargo, sus propiedades mecánicas. Sobre este punto la comunidad científica nunca había logrado alcanzar consenso. Algunos físicos concibieron al éter como un fluido perfecto mientras que otros lo imaginaron como un sólido elástico. Algunos pensaron que estaba inmóvil respecto de las estrellas fijas, pero otros sugirieron que era arrastrado, total o parcialmente, por los cuerpos en movimiento. Todas estas hipótesis presentaban diversas anomalías conceptuales y empíricas que nunca se resolvieron satisfactoriamente. Pronto pareció claro que era muy difícil imaginar un modelo mecánico del éter, aunque físicos eminentes como Maxwell y Kelvin lo hubieran intentado sin éxito. Si el éter era una sustancia material, indudablemente debía poseer propiedades muy diferentes de las de la materia ordinaria. Por ejemplo, para transmitir ondas transversales de altísima velocidad como las de la luz, el éter debía ser un sólido completamente elástico, pero, a la vez, debía tener, según vimos, una densidad nula o casi nula, como para no ofrecer resistencia al movimiento de los cuerpos y de la propia luz. Por otra parte, como también hemos visto, debía ser un sólido que penetrara la totalidad de la materia ordinaria para permitir así la propagación de la luz en medios materiales transparentes como el aire, el agua o el vidrio. En suma, se suponía que la interacción luz-éter, o bien era nula o a lo sumo despreciable. Esto debía explicar el hecho de que las

ondas de luz aparentemente no se disipaban al propagarse en el éter, a diferencia de lo que sucedía con otras ondas mecánicas en relación con su medio de propagación. Ahora bien, si tenemos en cuenta que la velocidad de la luz en el agua es menor que en el aire, tal como Foucault lo comprobara en 1850, ello suponía algún tipo de interacción con el medio material. Esto se expresaba formalmente en el hecho de que en la solución de la ecuación correspondiente a la evolución de la onda aparecía alguna magnitud característica de este medio (tal como el índice de refracción).

En las ecuaciones de Maxwell, c representa la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el vacío. En la teoría de Maxwell, la velocidad con que la luz se emite es constante, es decir, la misma en todas direcciones independientemente del movimiento de la fuente. Este hecho es común a todos los fenómenos ondulatorios. Por estas razones, resultaba natural pensar que el éter proporcionaba el referencial respecto del cual se definía la velocidad c . Sólo en este marco de referencia la velocidad de la luz debía ser constante. En cualquier otro referencial que se encontrase en movimiento uniforme respecto del éter, la velocidad de la luz debía depender de la dirección en la que se la midiese. Si un referencial se moviese con velocidad v respecto del éter, la velocidad de un rayo de luz respecto de dicho referencial debería ser $c + v$ si el movimiento del referencial tiene la misma dirección pero sentido contrario al del rayo de luz, y debería ser $c - v$ si tiene la misma dirección y sentido. Cuando el movimiento del referencial se realizara en una dirección diferente de la del rayo de luz, la velocidad de éste debería tener un valor intermedio entre $c + v$ y $c - v$. Éstas no son más que consecuencias de la transformación clásica de las velocidades incorporada en la mecánica newtoniana. Se sigue de ella que ninguna velocidad es invariante respecto de un cambio de referencial inercial. Naturalmente, se suponía que esta ley también debía ser válida para los fenómenos electromagnéticos.

La existencia del éter como un referencial privilegiado, en el cual la velocidad de la luz es constante, hace posible, en principio, medir la velocidad absoluta con la que un cuerpo se mueve. Maxwell sostuvo que un experimento electromagnético sería capaz de detectar dicha velocidad siempre que fuera lo suficientemente sensible como para medir cantidades del orden de v^2/c^2 (donde v es la velocidad del cuerpo respecto del éter). El propio Maxwell sugirió en 1878 que el único experimento terrestre posible consistiría en medir el tiempo que la luz tarda en recorrer, en un viaje de ida y vuelta, una determinada distancia paralela a la dirección del movimiento orbital de la Tierra (que es del orden de $1/10.000c$). El tiempo calculado debía ser diferente en el sentido del movimiento terrestre que en el sentido contrario. La diferencia de los tiempos, a su vez, permitiría calcular la velocidad de la Tierra respecto del éter. Maxwell creía que ningún experimento técnicamente concebible tendría la sensibilidad suficiente como para medir esta diferencia; no obstante, el experimento era físicamente posible.

2 EL PROBLEMA DEL MOVIMIENTO RESPECTO DEL ÉTER

El problema del movimiento de los cuerpos a través del éter luminífero planteó severas dificultades a la teoría ondulatoria de la luz durante todo el siglo XIX. ¿El éter se encontraba inmóvil y los cuerpos se movían libremente a través de él, o bien lo arrastraban total o parcialmente? En este trabajo no intentaremos siquiera esquematizar la compleja historia de las diferentes respuestas que los físicos dieron a esta pregunta. Sin embargo, nos resulta imprescindible señalar algunos de los hechos experimentales y de las hipótesis teóricas fundamentales que constituyeron el trasfondo de la teoría óptica presupuesta por Michelson y Morley en su célebre experimento.

En 1728 Bradley intentó medir la paralaje de las estrellas. Lo esperado era el registro de un movimiento elíptico, paralelo y opuesto al movimiento orbital terrestre, cuya amplitud debía depender de la distancia de la estrella a la Tierra. Sin embargo, el fenómeno luminoso que Bradley observó indicaba que la estrella, si bien “se movía” de manera elíptica, lo hacía perpendicularmente a la trayectoria terrestre. Este efecto de “aberración” resultaba compatible con una concepción corpuscular de la luz, como la que sostenía el propio Bradley, toda vez que la Tierra se hallase en movimiento ya que el resultado podía explicarse componiendo la velocidad orbital terrestre con la de la luz. Para que una estrella ubicada en la dirección perpendicular al movimiento del instrumento pudiese ser vista en el centro del campo visual, el telescopio debía tener una inclinación angular α dada por $\alpha = \arctg(v/c)$, siendo v la velocidad orbital de la Tierra. El ángulo α cambiaba durante el año debido a que la velocidad v no era constante. En este esquema era posible tomar la ley de composición de velocidades de Galileo para calcular la velocidad de la luz en el telescopio desde cualquier sistema de referencia para estrellas ubicadas en cualquier posición respecto de la Tierra. Cabe destacar que en el cálculo de hecho se tomaba $v < c$.

Ahora bien, la teoría ondulatoria tuvo durante más de un siglo serias dificultades para dar cuenta de este fenómeno, básicamente porque el ángulo de aberración no debía depender de la velocidad del telescopio respecto de la estrella (donde estaba la fuente de la luz), sino de su velocidad relativa al medio de propagación de la luz, el éter. Con la detección de la aberración de la luz, dio comienzo, entonces, una traumática historia en la que se intentó conciliar este fenómeno con la creencia de que la luz poseía características ondulatorias. No es nuestra intención – como ya indicáramos – describir esta historia de manera exhaustiva, sino tan sólo señalar algunos episodios importantes con el fin de llamar la atención acerca del contexto en el que se interpretó originalmente el experimento *M-M*.

En 1804 Young sostuvo que el fenómeno de la aberración estelar era explicable en el marco de la teoría ondulatoria de la luz si se suponía que la traslación de la Tierra

no afectaba la inmovilidad absoluta del éter (cf. Young, 1804). En 1818, Fresnel propuso una explicación diferente del fenómeno de la aberración. Postuló que las sustancias comunicaban una fracción de su movimiento al éter contenido en su interior. Fresnel se basó en los resultados obtenidos por Arago — ¡a la sazón un corpuscularista! —, quien en 1810 había mostrado que la aberración no se veía afectada por la refracción en un prisma (cf. Arago, 1853[1810]), esto es el ángulo de aberración α' (diferente al del vacío) era el mismo ya sea que se observase la luz de una estrella en el sentido del movimiento de la Tierra o en el sentido opuesto. En toda refracción los rayos luminosos modifican su velocidad — de c en el vacío a c/n en el medio refractante — (siendo n el índice de refracción en el medio). El experimento de Arago era evidentemente incompatible con la hipótesis de Young, ya que si el éter estuviera inmóvil, la velocidad de la luz en el sentido del movimiento de la Tierra debería ser diferente de su velocidad en el sentido opuesto. Con el fin de ofrecer una explicación ondulatoria del resultado nulo de Arago, posiblemente el primer resultado experimental en contra del éter,³ Fresnel propuso que debía existir un factor de arrastre cuyo valor era $f = 1 - n^{-2}$. Por consiguiente, la velocidad de la luz en un medio refringente resultaba igual a $c/n + f \cdot v$ (donde v es la velocidad del medio respecto del éter). Esta hipótesis, en ese momento puramente *ad hoc*, permitía compensar el supuesto arrastre *parcial* del éter y la aberración de la luz, de forma tal que la ley de Snell se cumpliera en el sistema solidario a la Tierra a un orden v/c (cf. Fresnel, 1818).

Sin embargo, en 1845 Stokes negó que esto sucediera y asumió que el éter era *completamente* arrastrado por la Tierra y por los cuerpos situados en su superficie (cf. Stokes, 1845). Postuló que el éter era un fluido viscoso que producía fricción con la Tierra en movimiento. La fricción de la Tierra lo arrastraba formando una sucesión de capas, de modo que el arrastre del éter era total al nivel de la superficie hasta que a determinada altitud alcanzaba una inmovilidad completa. Esta hipótesis explicaba inmediatamente el resultado nulo de Arago ya que el prisma siempre se encontraba en reposo respecto del éter y, por tanto, la velocidad de la luz debía ser la misma en cualquier dirección o sentido. Sin embargo, para explicar la aberración, Stokes debió suponer que el éter arrastrado no poseía ningún movimiento rotatorio, una hipótesis muy poco plausible a la luz de la mecánica de fluidos. Tiempo después, en 1886, Lorentz señaló que el éter de Stokes debía poseer un campo de velocidades tal que requeriría de condiciones de contorno inadmisibles (cf. Lorentz, 1887[1886]).

Por su parte, en 1851 Fizeau confirmó la predicción de Fresnel dentro de un margen de error del 15%, mediante un experimento óptico, independiente del de Arago, que consistió en medir la velocidad de la luz en corrientes de agua circulando en senti-

³ Véase Ferraro & Sforza (2005) para una explicación detallada de esta hipótesis.

dos opuestos. Fizeau también comprobó que el arrastre de éter por parte del aire era despreciable y, para cualquier experimento óptico, podía considerarse idéntico al del vacío (cf. Fizeau, 1851). Otra contrastación favorable para la teoría de Fresnel la obtuvo Airy en 1871 cuando mostró que el ángulo de aberración no cambiaba en un telescopio lleno con agua, tal como se deducía de la hipótesis del coeficiente de arrastre parcial del éter (cf. Airy, 1871). Estos dos experimentos proporcionaron una confirmación independiente a la hipótesis del arrastre parcial de éter y parecieron eliminar el carácter *ad hoc* que tenía cuando Fresnel la introdujo para explicar el resultado del experimento de Arago.

En 1874 Mascart culminó una serie de experimentos a orden v/c , empleando tanto fuentes de luz terrestres como luz solar, con resultados negativos en cuanto a la detección de diferencias en un sistema solidario con el movimiento de la Tierra respecto de un sistema supuestamente en reposo. Concluyó que “estos fenómenos no nos dan el medio de apreciar el movimiento absoluto de un cuerpo y que los movimientos relativos son los únicos que podemos alcanzar” (Mascart, 1874, p. 420). En la interpretación de Fresnel del arrastre parcial se omitía el hecho de que cada frecuencia de luz poseía un diferente índice de refracción, por lo cual el arrastre del éter debía depender no sólo del medio sino también de la frecuencia luminosa (del color). Mascart también reconoció este hecho en un experimento de doble refracción. Dado que el índice de refracción era diferente para los dos rayos, se seguía de esto que en el modelo de Fresnel se arrastraban diferentes cantidades de éter para cada uno de los dos rayos.⁴

Este fue, en líneas generales, el contexto de la teoría óptica en el que se planearon los experimentos llevados a cabo por Michelson desde 1881. Michelson, a partir de experimentos novedosos e independientes, intentó determinar el estado dinámico del éter sobre la base de tres presupuestos fundamentales: la naturaleza ondulatoria de la luz, la existencia de un éter luminífero y el movimiento de la Tierra.

3 EL EXPERIMENTO DE MICHELSON-MORLEY

Michelson, aceptando el desafío de Maxwell, diseñó un dispositivo lo suficientemente sensible como para detectar efectos del orden de v^2/c^2 . El objetivo del experimento era medir la velocidad relativa de la Tierra respecto del éter luminífero por medio de un dispositivo en el que la luz viajaba en el *aire*, por lo que el eventual coeficiente de arrastre de Fresnel podía despreciarse. Dado que los dispositivos experimentales diseñados y

⁴ Véase Janssen & Stachel (2004), p. 15. En este artículo puede encontrarse una exposición más extensa del problema del estado dinámico del éter.

empleados por Michelson han sido descritos en muchas ocasiones, podemos tratar este punto sucintamente.

En su experiencia de 1881, un rayo de luz se divide mediante un semiespejo en dos rayos perpendiculares entre sí. Cada uno de estos rayos “viaja” por un brazo y se refleja en un espejo; luego vuelve al punto de partida donde se forman ciertas franjas de interferencia características debido a pequeñas diferencias en las respectivas longitudes de los brazos y a la diferencia en la inclinación de los espejos. Las franjas más nítidas se obtienen ajustando, mediante un tornillo de precisión, la distancia o la inclinación de los espejos. Si el aparato se rota lentamente hasta un ángulo de 90° , la teoría ondulatoria de la luz, junto con la mecánica clásica, predicen un desplazamiento de las franjas de interferencia debido al cambio de dirección del instrumento respecto de la dirección del movimiento de la Tierra.

Michelson realizó este experimento sin observar el corrimiento predicho de las franjas de interferencia; extrajo la siguiente conclusión: “la interpretación de estos resultados es que no hay desplazamiento de las bandas de interferencia. El resultado de la hipótesis del éter estacionario se ha mostrado por tanto incorrecto, y se sigue la conclusión necesaria de que la hipótesis es errónea” (Michelson, 1881, p. 128). En realidad, este experimento resultó inconcluyente básicamente debido a un error de cálculo en la composición de velocidades en el brazo del instrumento orientado perpendicularmente al movimiento de la Tierra. Ese mismo año, cuando Michelson viajó a París para exponer sus resultados, Potier le señaló la dificultad, aunque el cálculo del propio Potier también resultó equivocado. Michelson publicó en 1882 una versión corregida de los cálculos de su experimento (cf. Michelson, 1882). En 1886, Lorentz efectuó un análisis detallado del experimento de Michelson y, de manera independiente, realizó los cálculos correctos (cf. Lorentz, 1887[1886]).⁵

Ese mismo año, Michelson y Morley efectuaron una medición más precisa del coeficiente de arrastre de éter de Fresnel. El experimento confirmó las predicciones

⁵ El error de Michelson consistió en no componer la velocidad orbital de la Tierra con la velocidad de la luz en el brazo vertical del instrumento. Potier sugirió que el cálculo corregido implicaba que no habría desplazamiento en las franjas de interferencia. Michelson, en cambio, llegó a la conclusión de que el desplazamiento de las líneas espectrales debía reducirse a la mitad, es decir, de 0.08 a 0.04 del ancho de una franja, muy cerca del error observacional que era de 0.02. En su trabajo de 1886, Lorentz también señaló que si se tomaba en cuenta un posible arrastre del éter en la superficie de la Tierra, de acuerdo con el coeficiente de arrastre de Fresnel, la velocidad del viento de éter debía reducirse a la mitad, y, por tanto, también el desplazamiento de las franjas de interferencia. Michelson conoció el trabajo de Lorentz por medio de Lord Rayleigh, pero en ese momento ya tenía los cálculos correctos. La carta de respuesta a Rayleigh, del 6 de marzo de 1887, muestra que hasta esa fecha, un mes antes de comenzar el experimento con Morley, Michelson no conocía el artículo de Lorentz (cf. Shankland, 1964, p. 29), artículo que luego citó dos veces en su trabajo escrito con Morley publicado en noviembre de 1887 (cf. Michelson & Morley, 1887, p. 334 y 335).

de éste y los alentó a suponer que la teoría de Fresnel era la explicación correcta del fenómeno de la aberración estelar (cf. Michelson & Morley, 1986).⁶

Para mostrar que la explicación de Fresnel era satisfactoria, quedaba realizar mediciones en un medio cuyo coeficiente fuese despreciable, esto es, que no produjese el consabido arrastre del éter (caso en que $f = 1 - n^{-2}$, por lo que $n \approx 1$ y $f \approx 0$). En consecuencia, en este experimento debía manifestarse un viento de éter producido por el movimiento de la Tierra. Para ello, en 1887, Michelson y Morley realizaron una nueva experiencia con un dispositivo mejorado que aumentaba más de nueve veces la distancia recorrida por la luz por medio de un sistema de reflexión múltiple. Corrigieron los cálculos de 1881 teniendo en cuenta “el efecto del movimiento de la Tierra a través del éter sobre la trayectoria del rayo en ángulo recto” (Michelson & Morley, 1887, p. 334). Suponiendo que la distancia que recorre la luz en cada brazo del aparato es igual a L (despreciando la diferencia de sus longitudes, del orden de la longitud de onda de la luz empleada), si el aparato se hallara en reposo respecto del éter, el tiempo empleado por la luz en un viaje de ida y vuelta debía ser igual a $2L/c$ en cada brazo. Si se toma en cuenta la velocidad orbital de la Tierra v , los tiempos debían ser diferentes cuando uno de los dos brazos se encontrase en dirección paralela a este movimiento y el otro en dirección perpendicular.⁷ En el primer caso, los cálculos mostraban que el tiempo total T_1 era igual a $2L/c \cdot (1 - v^2/c^2)$, mientras que en el segundo caso, que el tiempo T_2 era igual a $2L/c \cdot (1 - v^2/c^2)^{1/2}$.⁸

La deducción de estas dos relaciones sólo era posible sobre la base de un conjunto muy grande de hipótesis presupuestas. Sería difícil enumerarlas todas, por lo que, sin pretensiones de completitud, señalaremos las siguientes: 1. La Tierra se mue-

6 El coeficiente de arrastre de éter para el agua predicho por Fresnel era de 0.438. El valor medido por Fizeau en su experimento de 1851 fue de 5.0 ± 0.1 , mientras que el valor medido por Michelson y Morley en 1886 fue de 0.434 ± 0.03 .

7 Los cálculos correspondientes, que aquí omitimos, pueden encontrarse en cualquier libro de texto sobre relatividad especial (por ejemplo, French, 1968, Cap. 2, o Resnick, 1968, Cap. 1). Dos obras de fácil consulta son las de Mills (1994), p. 31-38; y Sartori (1996), p. 29-39. Este último es uno de los pocos libros que ofrece los cálculos completos del tiempo empleado por la luz en su viaje de ida y vuelta en cada brazo del instrumento en dos sistemas de referencia diferentes: el del éter (donde se supone que la velocidad de la luz es constante pero la distancia recorrida por la luz en dos direcciones perpendiculares entre sí es diferente) y el de la Tierra (donde la distancia recorrida por la luz en dos direcciones perpendiculares es la misma pero la velocidad de la luz no es constante sino que se compone con la velocidad orbital de la Tierra). Ambos cálculos dan, obviamente, el mismo resultado puesto que, en la mecánica clásica, el tiempo es invariante respecto de un cambio de referencial inercial. También deben mencionarse Jaffe (1960) y Shankland (1964), que contienen valiosa información histórica.

8 La diferencia de los tiempos era igual a $L(v^2/c^2)$ y el consiguiente desplazamiento de las franjas de interferencia igual a $2L(v^2/c^2)$. En el experimento de 1887, donde L se incrementaba casi por un factor de 10 respecto del experimento de 1881, el desplazamiento de las franjas de interferencia aumentaba de 0.04 a 0.4 del ancho de una franja, lo que debía observarse claramente ya que estaba muy por encima del margen de error observacional, que era de 0.01.

ve alrededor del Sol con una velocidad orbital del orden de los 30 km/s. 2. El éter está aproximadamente en reposo relativo respecto del Sol. 3. El éter prácticamente no es arrastrado por la Tierra, y, por consiguiente, está en movimiento relativo respecto de ésta. 4. La velocidad de la luz es constante respecto del éter. 5. La velocidad de la luz no es constante en el marco de referencia de la Tierra en movimiento, sino que se compone con la velocidad orbital de la Tierra, de acuerdo con la transformación clásica o galileana de velocidades. 6. La luz es un fenómeno ondulatorio que se revela en las franjas de interferencia producidas por los rayos de luz que convergen sobre el espejo. 7. La longitud de los brazos del instrumento permanece inalterada cualquiera sea la dirección del movimiento, en particular, no la afecta la rotación del aparato. Posiblemente hay otras hipótesis presupuestas que permanecen implícitas y son, por consiguiente, difíciles de identificar y tienen un peso en la interpretación que no podemos precisar.⁹

Michelson y Morley admitían que era posible que el Sol, y con él todo el Sistema Solar, estuviera en movimiento respecto del éter. Si así fuera, la velocidad de la Tierra respecto del éter debería ser mayor que su velocidad orbital. El valor de esta última velocidad respecto del éter era el mínimo que esperaban medir. Puesto que estaban preparados para obtener un valor mucho más alto, hubiesen atribuido un eventual excedente de velocidad al movimiento del Sistema Solar. Por esta razón, el resultado nulo, esto es $v = 0$, fue el más *inesperado* de todos. En verdad, era un resultado que no podía aceptarse en el contexto de la física de fines del siglo XIX pues ello hubiese significado que la Tierra estaba en reposo respecto del éter cósmico. El resultado nulo del experimento debía explicarse de alguna otra manera.¹⁰

Para comprender la situación en la que se encontraban Michelson y Morley es necesario hacer algunas precisiones más sobre el experimento de 1887. Ante todo, los instrumentos no medían la velocidad de la luz en diferentes direcciones ni los tiempos empleados por la luz en su viaje de ida y vuelta por cada brazo del aparato. Lo único que era directamente observable eran las franjas de interferencia producidas por los rayos de luz cuando se encontraban en su viaje de regreso. Mediante un microscopio gra-

⁹ El experimento, como cualquier otro, también hace idealizaciones. La Tierra no es un sistema inercial ya que se traslada con movimiento casi circular y se encuentra en rotación. No obstante, los efectos de la aceleración debida al cambio de la dirección de la velocidad se pueden despreciar porque el tiempo empleado por la luz en el experimento es muy corto. Por otra parte, también se idealiza el proceso de reflexión de la luz en los espejos móviles, en particular, se desprecia el cambio en el ángulo de reflexión. No es evidente que los efectos de la reflexión sean irrelevantes para el resultado del experimento.

¹⁰ El resultado, en realidad, no fue exactamente nulo. Los datos del experimento *M-M* exhibían una cierta tendencia sistemática. Un análisis estadístico más reciente muestra, sin embargo, que dichos datos eran compatibles con el resultado nulo y no indicaban que v fuese diferente de *zero* (cf. Handschy, 1982).

duado con un retículo, además, era posible observar el corrimiento de las franjas de interferencia con una precisión de una centésima de franja. Conociendo la longitud de onda de la luz empleada, los cálculos predecían un corrimiento máximo de cuatro centésimas de franja cuando se rotaba todo el aparato, lo cual se hallaba dentro del alcance de la resolución de los instrumentos empleados. Si llamamos N al número de franjas que pasan por el retículo a medida que el espectro de franjas se corre, el resultado nulo del experimento puede expresarse, en términos de cantidades observables, como $\Delta N = 0$. Este resultado contradice uno de los supuestos básicos del experimento según el cual $v \neq 0$, es decir, que la Tierra se mueve respecto del éter estacionario. El problema legado por Michelson y Morley a la comunidad científica de su tiempo consistía en explicar el resultado nulo ($\Delta N = 0$), sin postular que $v = 0$. El contexto histórico del experimento no permitía interpretarlo como una prueba de que la Tierra estaba inmóvil respecto del éter. En un contexto diferente, por ejemplo en el siglo XVII, la interpretación más evidente y natural del resultado nulo hubiera sido precisamente que $v = 0$. Por lo tanto, esta clase de experimento se habría tomado como una prueba directa de que la Tierra no se movía en el espacio y, posiblemente, habría retardado sensiblemente la aceptación generalizada de la teoría copernicana. En las conclusiones volveremos sobre este punto.

Cuando un experimento produce un resultado incompatible con las predicciones esperadas, la localización de la fuente del error resulta siempre un asunto complejo. Hace más de un siglo que Duhem mostró que en cualquier experimento en física nunca se contrasta una hipótesis o una teoría aislada, sino todo un conjunto de hipótesis o de teorías (cf. Duhem, 1914, p. 278).¹¹ En principio, todos los presupuestos del experimento están sujetos a revisión. El problema es que el experimentador generalmente no conoce todos los presupuestos de su propio experimento. Cualquier experimento contiene una cantidad considerable de hipótesis auxiliares y teorías presupuestas. Como señala Quine (1992, p. 17), ningún científico intenta siquiera hacer una lista completa de todos los presupuestos necesarios para deducir una determinada predicción contrastable a partir de una teoría. Esta sería probablemente una tarea interminable, ya que cada presupuesto puede tener, a su vez, otros presupuestos, y así suce-

¹¹ Esta tesis de Duhem ya aparece en un artículo temprano (Duhem, 1894), cuyo contenido se reproduce casi sin cambios en la primera y segunda edición, de 1906 y 1914, respectivamente, de su libro epistemológico fundamental (Duhem, 1914). El holismo epistemológico se conoce habitualmente en la filosofía de la ciencia contemporánea con el nombre de "Tesis de Duhem-Quine". Esta denominación no es particularmente adecuada porque existen diferencias importantes entre las tesis de cada uno de estos dos filósofos; por ejemplo, mientras Duhem limita el conocimiento presupuesto en un experimento en física a teorías del dominio de esta ciencia, Quine incluye también porciones considerables de la lógica, la matemática y el conocimiento no científico del sentido común (véase al respecto Gillies, 1993).

sivamente. En consecuencia, ningún experimentador ni tampoco ningún intérprete de los resultados experimentales en un momento histórico determinado conoce la totalidad de los presupuestos del experimento que realiza o interpreta. La revisión de un experimento, entonces, consiste, a veces, en hallar un presupuesto oculto que resulta dudoso o directamente inaceptable a la luz del conocimiento vigente.

El experimento *M-M* se realizó durante sólo tres días: el 8, 9 y 11 de julio de 1887. Tal como lo indicaran los propios autores hacia el final de su artículo, existía la posibilidad de que el movimiento de traslación de la Tierra estuviera compensado, casi exactamente, por un eventual movimiento del conjunto del Sistema Solar en el sentido opuesto. Aunque esta coincidencia era improbable, la mejor manera de excluirla consistía en realizar el experimento seis meses más tarde cuando la velocidad de la Tierra cambiara de sentido. Precisamente, en 1879 Maxwell había señalado la necesidad de verificar si el Sistema Solar se movía o no respecto del éter, empleando un método análogo al utilizado por Römer con los eclipses de Io (esto es, cuando Júpiter viajaba en el sentido del movimiento del Sistema Solar y en el sentido contrario).

Otro problema que el experimento *M-M* dejaba abierto era el de la existencia de otro tipo posible de arrastre del éter. Podría ocurrir, en efecto, que las paredes del laboratorio en las que estaba encerrado el instrumento arrastraran al éter de tal modo que éste se encontrara en reposo respecto de la fuente de luz que se estaba utilizando. Se sugirió entonces que el experimento debería repetirse al aire libre, preferentemente en un lugar elevado como la cima de una montaña, donde, presumiblemente no habría arrastre de éter. También había un problema similar con los cuerpos opacos, que podían no dejar pasar el éter. Dado que el instrumental de Michelson y Morley estaba aislado mediante una cubierta de madera, que no era transparente a la luz, podría ocurrir que el éter fuera arrastrado por esta cubierta.

La tercera dificultad consistía en la utilización de una fuente de luz terrestre y no de, por ejemplo, luz estelar que podría provenir de cuerpos en reposo respecto del éter. En principio, era posible que un experimento que emplease luz exterior diera un resultado positivo. Es interesante tener en cuenta que las primeras experiencias relacionadas con este problema, las de Römer (en 1676) y la de Bradley (en 1728), se llevaron a cabo, precisamente, empleando luz exterior a la Tierra; pero ellas no pretendían medir la velocidad de la Tierra respecto del éter, suponían que la Tierra se movía y buscaban medir la velocidad de la luz o la paralaje de las estrellas...

Michelson y Morley no repitieron el experimento de forma tal que pudieran responder a cada una de estas posibles objeciones. Sin embargo, el mismo tipo de experimento se realizó durante muchos años a diferentes alturas, empleando luz solar o estelar, e incluso en un ámbito aislado por un cristal, donde se suponía que el éter (del laboratorio) no sería arrastrado puesto que el cristal era transparente a la luz. Todos

estos experimentos, bajo el mismo tipo de interpretación ofrecida por Michelson y Morley, esto es, en el contexto de la teoría del éter, dieron resultados negativos. En ninguna ocasión se detectó la existencia de un “viento de éter” de una magnitud siquiera cercana a la predicha. Los pocos resultados positivos, como los de Miller en 1924-25, podían atribuirse a errores experimentales o influencias perturbadoras, como un exceso de temperatura o la vibración de los instrumentos.¹²

4 LA INTERPRETACIÓN DEL EXPERIMENTO ANTES DE 1905

Michelson y Morley nunca presentaron su experimento como crucial entre las hipótesis de Fresnel y Stokes respecto de la hipótesis del arrastre del éter. Al comienzo de su artículo de 1887 indicaron que su objetivo era contrastar experimentalmente la hipótesis de Fresnel de que el éter está en reposo excepto en el interior de los medios transparentes (cf. Michelson & Morley, 1887, p. 334). Sin embargo, en las conclusiones expresaron el resultado negativo de la siguiente manera:

De todo lo que antecede parece razonablemente cierto que si hay algún movimiento relativo entre la Tierra y el éter luminífero debe ser pequeño; lo suficientemente pequeño para refutar enteramente la explicación de Fresnel de la aberración. Stokes ha dado una teoría de la aberración que supone que el éter en la superficie de la Tierra está en reposo con respecto a ésta, y sólo requiere en adición que la velocidad relativa tenga un potencial; pero Lorentz muestra que estas condiciones son incompatibles. Lorentz propone, entonces, una modificación que combina algunas ideas de Stokes y Fresnel, y supone la existencia de un potencial junto con el coeficiente de Fresnel. Ahora bien, si fuera legítimo concluir del presente trabajo que el éter está en reposo con respecto a la superficie de la Tierra, según Lorentz no podría haber un potencial de velocidad, y su propia teoría también fracasaría (Michelson & Morley, 1887, p. 341).

¹² Miller sostenía que había medido un viento de éter de 8 km/s, lo cual estaba dentro del alcance del experimento original de *M-M* y de otros posteriores. En 1933 Miller todavía consideraba que sus resultados positivos se debían a una genuina corriente de éter y que los experimentos que producían resultados nulos no reproducían todas las condiciones de sus propios experimentos (cf. Miller, 1933). La cuestión sólo se aclaró en 1955 cuando Shankland y sus colaboradores realizaron un estudio estadístico detallado de los datos de Miller y concluyeron que éstos podían explicarse por las variaciones de la temperatura en sus instrumentos (cf. Shankland *et al.*, 1955). Esta había sido la conjetura del propio Einstein cuando Miller le comunicó, el 25 de Diciembre de 1925, los resultados de sus experimentos (cf. Holton, 1969).

Adviértase el tono cauteloso y ambiguo de esta conclusión que es puramente negativa. Generalmente, cuando un experimento no ofrece los resultados esperados, sus diseñadores suelen discutir algunos de los presupuestos incluidos en la interpretación. Aquellos que se revisan primero son siempre los que se consideran menos evidentes o menos firmemente establecidos. Claramente, en el caso de la medición de la velocidad de la luz, un presupuesto inconvencional era el de que la Tierra se trasladaba alrededor del Sol. Michelson y Morley tampoco estaban dispuestos a revisar el hecho de que la luz era un fenómeno ondulatorio que requería de la existencia del éter. Uniendo la hipótesis del movimiento terrestre con la conclusión anterior, lo que parecía imponerse era que, en su superficie, la Tierra arrastraba al éter; por tanto, Michelson y Morley consideraron refutada la hipótesis de que el éter no era arrastrado. La hipótesis del arrastre de éter implicaba que éste debía ser menor en lugares distantes de la superficie de la Tierra; por consiguiente, el resultado del mismo experimento debería ser diferente si se realizara en la cima de una montaña.

La conclusión, como es obvio, no se deducía necesariamente; era sólo una de las muchas posibles. Desde un punto de vista lógico, es posible considerar que el experimento refutaba alguno de los supuestos que mencionamos antes, o cualquier conjunción de ellos. Como es bien conocido, FitzGerald en 1889 y, de manera independiente, Lorentz en 1892 propusieron una interpretación diferente. Sostuvieron que el experimento refutaba la hipótesis de que la longitud de los brazos del instrumento permanecía inalterada cuando éste se encontraba en movimiento respecto del éter, un supuesto tácito del experimento *M-M*. Formularon, entonces, la hipótesis de que la longitud de los cuerpos rígidos que se mueven respecto del éter no es invariante, sino que se contrae en la dirección del movimiento por un factor igual a $(1-v^2/c^2)^{1/2}$, de modo que $L_v = L (1-v^2/c^2)^{1/2}$ (donde L_v es la longitud de un cuerpo que se mueve con velocidad v respecto del éter y L es su longitud cuando está en reposo respecto del éter). De acuerdo con esto, en el caso del experimento *M-M*, la longitud del brazo alineado con el movimiento de la Tierra se acorta, mientras que la longitud del brazo perpendicular a dicho movimiento permanece inalterada. Se trata de una contracción absoluta de la longitud, es decir, una contracción respecto del éter. Esto explicaría el resultado nulo del experimento porque ahora los tiempos del viaje de ida y vuelta de la luz en cada brazo del instrumento resultan iguales a $2L / c \cdot (1-v^2/c^2)^{1/2}$. Cuando se rota el instrumento, las longitudes de los brazos se compensan de tal manera que los tiempos de viaje de la luz siempre permanecen iguales. Por ejemplo, cuando ambos brazos se encuentran a 45° respecto de la dirección del movimiento de la Tierra, cada uno de ellos experimenta una contracción igual a $1/2 \cdot (1-v^2/c^2)^{1/2}$. Esto explicaría por qué nunca se observa un corrimiento de las franjas de interferencia.

Se considera habitualmente que la hipótesis de la contracción es puramente *ad-hoc*, dado que se la propuso exclusivamente para acomodar el resultado del experimento *M-M* con el fin de salvar de la refutación a la hipótesis del éter en reposo. Esta afirmación es discutible y depende de cómo se entienda el concepto de hipótesis *ad-hoc*.¹³ Lo cierto es que la contracción de FitzGerald-Lorentz es una hipótesis, en principio, arbitraria. En efecto, hay muchas otras hipótesis del mismo tipo que también podrían dar cuenta del resultado nulo, por ejemplo, la que afirma que el brazo orientado perpendicularmente a la dirección de movimiento se *expande* según el factor $(1-v^2/c^2)^{1/2}$, de modo que $L'v = L / (1-v^2/c^2)^{1/2}$ (donde $L'v$ es la longitud de un cuerpo que se mueve con velocidad v respecto del éter pero está orientado perpendicularmente a la dirección del movimiento). Esta hipótesis no es empíricamente equivalente a la anterior ya que predice que los tiempos del viaje de ida y vuelta de la luz en cada brazo del instrumento son iguales a $2L / c \cdot (1-v^2/c^2)$. Ambas hipótesis, la de la contracción y la de la expansión, son en principio falsables en el sentido de Popper, aunque el experimento *M-M* es compatible con las dos.¹⁴ No obstante, es concebible un experimento crucial que las ponga a prueba,¹⁵ por ejemplo, mediante la medición exacta de los tiempos empleados por los rayos de luz en el viaje de ida y vuelta por cada brazo del instrumento. Un experimento así es físicamente posible, aunque irrealizable desde el punto de vista tecnológico. En cualquier caso, tal experimento no podría ser decisivo ya que tendría sus propios presupuestos, que, a su vez, también podrían cuestionarse.

Observemos las diferencias conceptuales entre las interpretaciones de Michelson y Morley y de Lorentz del mismo dato experimental $\Delta N = 0$. Para los primeros el tiempo que mide la duración de los fenómenos es absoluto y la longitud de un cuerpo material es invariante, esto es, independiente de su estado de movimiento. Además, la velocidad de la luz no es constante sino que se compone con la velocidad de la Tierra de acuerdo con las transformaciones de Galileo. Esto los lleva a interpretar que la diferencia

¹³ Zahar (1989, p. 47-52), examina diversos sentidos en los que la hipótesis de la contracción de Lorentz podría considerarse *ad hoc*. Señala que Lorentz en 1892 *dedujo* esta hipótesis de otra hipótesis más general acerca del comportamiento de las fuerzas moleculares en los cuerpos en movimiento. Sostiene, entonces, que la hipótesis de la contracción no se concibió exclusivamente con el fin de explicar el resultado del experimento *M-M*, y, en ese sentido al menos, no fue una hipótesis *ad-hoc*. Sin embargo, es indudable que Lorentz conocía el experimento *M-M* y lo tuvo en cuenta al formular su electrodinámica de los cuerpos en movimiento. Por otra parte, en la breve nota de FitzGerald (1889), publicada tres años antes del trabajo de Lorentz, la hipótesis de la contracción se introdujo explícitamente para explicar el resultado del experimento *M-M* y, por consiguiente, fue *ad-hoc* también en el sentido señalado por Zahar.

¹⁴ Popper había considerado en 1934 que la hipótesis de FitzGerald-Lorentz no tenía consecuencias falsables, pero luego se rectificó y aceptó la crítica de Grünbaum (1959). Véase Popper (1992, p. 83 y nota 1).

¹⁵ No se sigue de aquí que el experimento de Kennedy-Thorndike (1932), que utilizó un instrumento con brazos de longitudes desiguales, sea el experimento crucial que haya refutado la hipótesis de la contracción, como se afirma a menudo (véase una discusión detallada de este punto en Laymon, 1980).

inobservada en la velocidad de la luz respecto de la dirección del movimiento de la Tierra implica que la Tierra no se mueve respecto del medio en el cual se propaga la luz, o sea, arrastra al éter. Para Lorentz, en cambio, el éter se halla en reposo absoluto, lo cual significa según él que ninguna de sus partes se mueve respecto de las otras. Por consiguiente, no puede ser arrastrado por la Tierra. Dado que Lorentz comparte los presupuestos de que el tiempo es absoluto y la velocidad de la luz en la Tierra no es constante, considera que la mejor explicación posible es suponer que la longitud de los cuerpos es relativa a su movimiento respecto del éter estacionario.

Tanto la hipótesis del arrastre del éter como la de la contracción de las longitudes de los cuerpos en movimiento necesitaban, para ser aceptables, una justificación adicional al mero hecho de acomodar el resultado nulo del experimento *M-M*. Era necesario, además, mostrar que tales hipótesis eran compatibles con otros fenómenos ópticos y electromagnéticos establecidos en ese momento, tales como la aberración de la luz estelar. Sus autores, sobre todo Lorentz, intentaron hacerlo, pero no seguiremos aquí las intrincadas explicaciones que ofrecieron.¹⁶ Nos contentaremos con señalar que dichas hipótesis resultaban conservadoras dado que intentaban preservar la existencia del éter a la vez que la mecánica clásica y la teoría electromagnética entonces vigentes. Por otra parte, si bien había otras maneras de interpretar el experimento *M-M*, todas ellas implicaban revisar presupuestos mucho más arraigados.

5 LOS POSTULADOS DE EINSTEIN

Einstein presentó su teoría de la relatividad especial de manera deductiva, aunque no rigurosamente axiomatizada, considerándola basada en dos postulados o hipótesis fundamentales: el *principio de relatividad* y el *principio de constancia de la velocidad de la luz*. Al comienzo de su trabajo fundacional de 1905, los formula de esta manera:

1. Si dos sistemas de coordenadas están en movimiento relativo de traslación paralela uniforme, las leyes de acuerdo con las cuales cambian los estados de un sistema físico no dependen de con cuál de los dos sistemas están relacionados dichos cambios.
2. Todo rayo luminoso se mueve en el sistema de coordenadas “estacionario” con una velocidad determinada V , independientemente de si este rayo luminoso es emitido por un cuerpo estacionario o en movimiento (Einstein, 2001[1905], p. 114-5).

¹⁶ Véase Zahar (1989, Cap. 2), para una exposición precisa del desarrollo de la electrodinámica de Lorentz, basada en la existencia del éter.

Estos postulados han sido comentados en innumerables ocasiones, por lo que no necesitaremos extendernos mucho sobre ellos.¹⁷ El primer postulado afirma la equivalencia de todos los referenciales inerciales, es decir, aquellos que no poseen rotación y se mueven unos respecto de otros con movimiento uniforme. Esta hipótesis estaba firmemente establecida en el ámbito de la mecánica desde Newton, pero su validez para el dominio del electromagnetismo era incompatible con la idea de un éter estacionario, el que constituía una suerte de referencial privilegiado semejante al espacio absoluto. Al postular la validez del principio de relatividad para todos los fenómenos físicos sin restricciones, Einstein pudo formular una teoría electrodinámica que no necesitaba sostener la existencia del éter. De allí su célebre afirmación según la cual “la introducción de un éter luminífero se mostrará superflua” (Einstein, 2001[1905], p. 112).

El segundo postulado afirma, respecto de la propagación de la luz, una propiedad que es común a todos los fenómenos ondulatorios: la velocidad de las ondas no depende del movimiento de la fuente respecto del medio de propagación. No se sigue de esto que la velocidad de las ondas sea la misma en otros referenciales en movimiento uniforme relativo al medio en que éstas se propagan. Esto hace que el segundo postulado sea aparentemente incompatible con el primero. Sin embargo, como se sabe, la relatividad de la simultaneidad, introducida por Einstein, permite reconciliarlos.

Los dos postulados, tomados conjuntamente, implican el resultado más revolucionario de la relatividad especial: que la velocidad de la luz en el vacío es invariante, o sea, la misma en todo referencial inercial, esto es, independiente del movimiento de la fuente y del observador. La relatividad de las longitudes y de los intervalos temporales resulta, entonces, una consecuencia de la invariancia de la velocidad de la luz. A su vez, el referencial proporcionado por el éter estacionario pierde, evidentemente, su carácter privilegiado dado que la velocidad de la luz no sólo tiene el mismo valor c respecto del supuesto éter, sino en cualquier otro referencial inercial.

En escritos posteriores, Einstein afirmó que los dos postulados no eran suficientes para deducir rigurosamente las transformaciones de Lorentz (por ejemplo, Einstein, 2005[1920], p. 162). Era necesario postular la homogeneidad e isotropía del espacio (o, más precisamente, del espacio-tiempo), implícitas en la formulación de 1905. Sin embargo, la invariancia de la velocidad de la luz, que se sigue exclusivamente de los dos postulados, es todo lo que se necesita, como veremos, para proporcionar una explicación del resultado nulo del experimento *M-M*.

Los intérpretes de Einstein han discutido interminablemente sobre el contexto de descubrimiento de estos dos postulados. En particular, se ha planteado la pregunta

¹⁷ Para un análisis detallado del artículo de Einstein de 1905 véase Torretti (1996, Cap. 3). Sobre la historia del principio de relatividad, véase Paty (1999).

acerca de si Einstein conocía el experimento *M-M* antes de 1905 y si lo tuvo o no en cuenta para formular la relatividad especial. No vamos a tomar posición sobre este delicado problema histórico, sin embargo, podemos resumir la situación de la siguiente manera.

Einstein no cita el experimento *M-M* en su artículo original de 1905 ni tampoco, significativamente, en su autobiografía escrita en 1946 (Einstein, 1949). En todos los lugares donde menciona este experimento, desde 1907 hasta el final de su vida, jamás afirma que haya desempeñado un papel importante en la génesis de la relatividad especial.¹⁸ Es improbable que antes de 1905 hubiera leído los artículos originales de Michelson sobre el tema. Se acepta, sin embargo, que Einstein conocía el resultado del experimento *M-M* por la lectura del ensayo de Lorentz de 1895, quien lo discute con detalle. Por su parte, el conocimiento de este trabajo de Lorentz está atestiguado por diversas declaraciones independientes del propio Einstein.¹⁹

En los numerosos lugares en los que se refiere al origen de los dos postulados de la relatividad especial, Einstein afirma, una y otra vez, y siempre de manera muy escueta, que tomó el principio de relatividad de la mecánica newtoniana, extendiéndolo a los fenómenos electromagnéticos, y el principio de constancia de la velocidad de la luz de la electrodinámica de Maxwell y Lorentz.²⁰ La relatividad especial consistió en hacer compatibles estos dos postulados reemplazando las transformaciones de Galileo por las de Lorentz. Por otra parte, cuando Einstein se refiere a las bases experimentales de sus postulados, menciona otros fenómenos físicos: la inducción electromagnética de Faraday como apoyo al principio de relatividad; el experimento de Fizeau (1851) sobre la propagación de la luz en una corriente de agua y el de Airy (1871) sobre la aberración de la luz estelar medida con un telescopio lleno de agua como apoyo al principio de constancia de la velocidad de la luz. Después de 1905, todas las veces que cita el experimento *M-M* lo considera como evidencia a favor del principio de relatividad pero nunca del de constancia de la velocidad de la luz. Resulta, entonces, razonable suponer que si este experimento desempeñó algún papel en la génesis de la relatividad espe-

¹⁸ Véanse Holton (1969) y Shankland (1963) para mayores detalles y citas de pasajes relevantes.

¹⁹ Véanse Shankland (1973); Pais (1982, Cap. 6); Stachel (1982) y Paty (1993, Cap. 3).

²⁰ Por ejemplo, Einstein (1980[1919]), (1923) y (1949), entre muchos otros. El lugar donde Einstein analiza con mayor detalle el experimento *M-M* es su trabajo inédito de 1920, publicado por primera vez recién en 2002 (cf. Einstein, 2005[1920]). Por otra parte, el único lugar en que declararía explícitamente haber conocido este experimento antes de la formulación de la relatividad especial, es en su conferencia de 1922 pronunciada en Kyoto, traducida sólo en 1982 (Einstein, 1982[1922]). Esta es una fuente poco confiable porque no se conserva el texto alemán de la conferencia, sino sólo su transcripción al japonés. La traducción de 1982 ha sido objetada como errónea precisamente en el pasaje en que se refiere al experimento *M-M* (véase Itagaki, 1999). En cualquier caso, no hay garantía alguna de que el texto conservado sea una reproducción fiel de las palabras de Einstein.

cial, fue sólo parcial dado que Einstein lo tomó como uno más entre otros experimentos que apoyaban sus postulados. No parece haber tenido ninguna influencia en la adopción del postulado de constancia de la velocidad de la luz, a pesar de lo que sostienen muchas obras sobre relatividad.²¹ Entonces, en principio, al menos, Einstein podría haber formulado los dos postulados de la relatividad especial exactamente como lo hizo en 1905 sin haber conocido el experimento *M-M* ...²²

Una de las razones del éxito de la teoría de Einstein consistió, indudablemente, en su carácter axiomático. Sus dos postulados son sumamente simples, pero tienen consecuencias notables. Consideremos aquí solamente las que se refieren a la existencia del éter y a invariancia de la velocidad de la luz.

Ante todo, el primer postulado no implica que el éter no exista, como se dice a menudo, sino solamente que no es necesario para la formulación de la electrodinámica. Weyl, por ejemplo, en su gran obra sobre relatividad afirma que:

La única respuesta razonable que se ha dado a la pregunta de por qué la traslación en el éter no puede distinguirse del reposo fue la de Einstein, a saber, ¡que *no hay éter!* (Weyl, 1952, p. 172).

Einstein, sin embargo, no suscribió esta interpretación. En el artículo original de 1905 solamente dijo que:

²¹ Este punto lo ha esclarecido Stachel (1982) después de examinar todos los pasajes de la obra de Einstein anteriores a 1922 en los que se menciona el experimento *M-M*. Los libros de texto sobre relatividad especial a veces lo consideran como evidencia a favor del postulado de constancia de la velocidad de la luz (por ejemplo, Smith, 1995, Cap. 2) y a veces como una prueba experimental del postulado de relatividad (por ejemplo, Shadowitz, 1988, Cap. 9).

²² El vínculo entre el experimento *M-M* y la teoría de la relatividad especial parece haberse forjado tempranamente. Hacia 1920 ya era común presentar la relatividad especial en los libros de texto siguiendo una secuencia histórica que comienza con los primeros intentos de detectar el movimiento de la Tierra respecto del éter, sigue con el experimento *M-M* y sus diferentes interpretaciones, y culmina con la teoría de Einstein. Generalmente, se sugiere, aunque no siempre se lo diga explícitamente, que la relatividad especial se propuso para explicar el resultado del experimento *M-M* de manera más satisfactoria que la teoría de Lorentz. Siguen este esquema argumental obras como la de Born (1962), publicada originalmente en 1920, y, para mencionar una escrita en lengua española, la de Cabrera (1923). Con mayor o menor detalle adoptan este enfoque clásico obras como las de Møller (1952), Bohm (1965), French (1968), Resnick (1968), Sartori (1996) y la mayoría de los libros de divulgación. Incluso las obras que no adoptan el enfoque histórico, casi siempre mencionan el experimento *M-M* en relación con los postulados de Einstein, por ejemplo, Weyl (1952), Bridgman (1965), Landau & Lifchitz (1970), Ellis & Williams (1988) (donde se lo confunde con experimentos posteriores realizados con luz estelar), Taylor & Wheeler (1992) y Schutz (1993), entre muchos otros que podrían citarse. El propio Einstein presentó una secuencia histórica semejante al enfoque clásico en su artículo inédito de 1920, publicado en 2002 (cf. Einstein, 2005). En su libro de carácter divulgativo de 1917, Einstein sólo menciona el experimento *M-M* al final de su exposición de la relatividad especial y lo presenta como una de las experiencias que confirman su teoría (cf. Einstein, 1917, §16). Es significativo que en el Prólogo de esta obra Einstein afirme que expone sus ideas respetando, por lo general, el orden y el contexto en que realmente surgieron.

La introducción de un ‘éter luminífero’ se mostrará superflua, puesto que la idea que se desarrollará aquí no requerirá de un ‘espacio en reposo absoluto’ dotado de propiedades especiales, ni asigna un vector velocidad a un punto del espacio vacío donde están teniendo lugar procesos electromagnéticos (Einstein, 2001 [1905], p. 112).

Quince años más tarde, Einstein reconoció que en 1905 había pensado que “no se podía hablar ya de ningún modo de la existencia del éter en la física”, pero que “esta decisión era demasiado radical” (Einstein, 2005, p 166). Después de formular la teoría general de la relatividad, Einstein reivindicó la existencia del éter basándose en el hecho de que, según esta teoría, el espacio tenía propiedades físicas. En una célebre conferencia dictada en 1920 extrajo la siguiente conclusión:

[...] según la teoría general de la relatividad el espacio está dotado de cualidades físicas; por tanto, en este sentido existe un éter. Según la teoría general de la relatividad es impensable la existencia de un espacio sin éter, porque en un espacio así no sólo encontraríamos que nunca se produciría la propagación de la luz, sino que además no sería posible la existencia de varas de medir o de relojes, por lo que tampoco habría distancias espacio-temporales en el sentido de la física. Sin embargo, no se puede concebir que el éter esté dotado de la propiedad característica de los medios perceptibles, que es la de estar constituidos por partes de las que se puede hacer un seguimiento en el tiempo; el concepto de movimiento no se puede aplicar al éter. (Einstein, 2005[1920], p. 144-5).

En consecuencia, la relatividad especial – localmente válida en relatividad general – *no es incompatible* con la existencia del éter. Requiere, sin embargo, que se abandone la idea de un éter en reposo análogo al espacio absoluto. Implica que no es posible detectar ningún movimiento respecto del éter, puesto que éste no se halla en estado de movimiento alguno. Mientras los experimentos del tipo *M-M* continuaron realizándose en el marco de la teoría tradicional del éter, hasta la década de 1930, la relatividad especial predecía para todos ellos un resultado negativo, como de hecho ocurrió.

La invariancia de la velocidad de la luz no provino, entonces, de un resultado experimental sino que constituyó una hipótesis teórica que permitía explicar, desde una nueva perspectiva, los resultados nulos de todos los experimentos del tipo de los de *M-M*. Como es evidente, para mantener la constancia de la velocidad de la luz en todo referencial inercial, es necesario despojar de un carácter invariante a las longitudes de los cuerpos y a la duración temporal de los procesos físicos. Estas propiedades se vuelven relativas a cada referencial inercial como se expresa en las transformacio-

nes de Lorentz. Precisamente, dichas transformaciones, de acuerdo con la interpretación de Einstein, conducen a una ley de suma de velocidades que deja invariante la velocidad de la luz. De esta perspectiva, resulta, de hecho, una nueva mecánica que reemplaza a la newtoniana.

La originalidad de Einstein consistió en postular dos hipótesis básicas que tenían como consecuencia la disolución de los problemas que se discutían en el contexto de la teoría del éter electromagnético. La equivalencia de todos los referenciales inerciales para la formulación de la electrodinámica, evidentemente, estaba en conflicto con la existencia de un referencial privilegiado tal como el éter estacionario. Antes de 1905, la validez del principio de relatividad de la mecánica estaba en duda respecto de la electrodinámica; Einstein simplemente se *deshizo* del problema *postulando* de manera irrestricta la validez del principio de relatividad en el dominio de los fenómenos mecánicos, ópticos y electromagnéticos. Sin embargo, se podría haber intentado resolver el conflicto entre la mecánica y el electromagnetismo modificando esta última teoría. La solución de Einstein, consistente en mantener la teoría electromagnética y modificar la mecánica, fue mucho más radical y revolucionaria que todos los intentos de reacomodar o modificar las concepciones del éter. A largo plazo, pero no de manera inmediata, la relatividad especial resultó mucho más exitosa que cualquiera de los programas de investigación del electromagnetismo basados en la existencia de aquel medio. Dichos programas persistieron durante muchos años después de 1905 pero perdieron gradualmente el consenso de la comunidad científica. La simplicidad y el poder unificador de la teoría de Einstein hicieron que la relatividad especial se impusiera mayoritariamente, aun al costo de tener que aceptar consecuencias tan poco intuitivas como la invariancia de la velocidad de la luz.

6 LA INTERPRETACIÓN DEL EXPERIMENTO DESPUÉS DE 1905

La explicación que la teoría de la relatividad especial proporciona del resultado del experimento *M-M* es extremadamente simple. Se basa en la invariancia de la velocidad de la luz. En efecto, si la velocidad de la luz es la misma en todo referencial inercial, el experimento *M-M* debe dar el mismo resultado tanto si la Tierra se mueve alrededor del Sol como si está en reposo respecto de él. En ambos casos, el tiempo total empleado por la luz en un viaje de ida y vuelta por cada brazo del instrumento cuando se los mide en un referencial fijo a este instrumento es $T_0 = 2Lo / c$ (donde T_0 es el tiempo propio entre los eventos de emisión y recepción del rayo de luz y Lo es la longitud propia de cada brazo del instrumento, que se suponen iguales). Puesto que la velocidad de la luz *no* se compone con la velocidad de la Tierra, la rotación de los brazos del instrumento

no produce ningún efecto sobre la velocidad de la luz y, por consiguiente, sobre las franjas de interferencia observadas.

De acuerdo con la relatividad especial, suponiendo que un observador se moviera con velocidad v en la dirección de uno de los brazos, la longitud de éste resultaría acortada en un factor igual a $(1-v^2/c^2)^{1/2}$, mientras que la longitud del brazo perpendicular a la dirección del movimiento permanecería inalterada. En tal caso, los tiempos de ida y vuelta empleados por la luz, medidos por el observador móvil, no serían iguales. En el brazo paralelo a la dirección del movimiento del observador, el tiempo sería $T_1 = 2L_0 (1-v^2/c^2)^{1/2} / c$, pero en el brazo perpendicular a la dirección del movimiento, el tiempo sería $T_2 = 2L_0 / c$. Es evidente que T_1 es menor que T_2 , por lo que los rayos de luz no retornan simultáneamente al lugar de emisión. Se trata de un ejemplo de la relatividad de la simultaneidad. En la relatividad especial sólo existen movimientos relativos de los referenciales entre sí (de acuerdo con el primer postulado); cualquier experimento, mecánico o electromagnético, debe dar el mismo resultado en todo referencial inercial. Por consiguiente, en principio es imposible detectar un movimiento absoluto, o una velocidad absoluta, como la que el experimento *M-M* pretendía encontrar. De esta manera queda explicado el resultado nulo, no sólo de este experimento, sino de todo experimento del mismo tipo.²³

Desde el punto de vista del contexto de descubrimiento de la relatividad especial, puede afirmarse que Einstein no construyó esta teoría con el fin de explicar una supuesta evidencia experimental proporcionada por el experimento *M-M* o cualquier otro acerca del movimiento de la Tierra en el éter. El objetivo primordial de Einstein consistió en resolver un problema conceptual: la incompatibilidad entre la mecánica newtoniana y la electrodinámica de Maxwell. Sin embargo, en el contexto de justificación, el experimento *M-M* ha operado y opera como elemento confirmatorio de su teoría. De hecho, constituyó una de las primeras evidencias empíricas para la relatividad especial. No se trata de la predicción de un hecho nuevo, es decir desconocido antes de la formulación de la teoría, sino de un caso de acomodación de una evidencia previamente conocida (la ausencia de corrimiento de las franjas de interferencia). Este resultado se interpreta de una manera completamente novedosa: como una consecuencia de la invariancia de la velocidad de la luz, fenómeno inconcebible cuando Michelson y Morley realizaron su experimento. Dado que la relatividad especial permite deducir el resultado nulo del experimento *M-M*, dicha evidencia actúa como elemento confirmatorio de esta teoría. Los filósofos de la ciencia han discutido extensamente el problema del valor confirmatorio de esta clase de evidencias, esto es, si la predicción de

²³ Sobre el análisis relativista del experimento *M-M* desde el punto de vista de un referencial en movimiento respecto del interferómetro, véase Schumacher (1994). Este caso es demasiado complejo como para examinarlo aquí.

fenómenos nuevos es más o menos importante que la acomodación de fenómenos conocidos. No obstante, es un hecho indiscutible que los científicos consideran que los datos ya conocidos confirman a la teoría que los implica, sobre todo, cuando se cree que hasta entonces (en este caso antes de 1905) no había una explicación alternativa plenamente satisfactoria de esos datos.²⁴

Si bien el experimento *M-M* confirmó la relatividad especial, de ninguna manera fue suficiente como para justificar la aceptación de esta teoría. En general, el proceso que lleva a la aceptación consensuada de una teoría y al rechazo de sus rivales requiere un tiempo más o menos prolongado. Es necesario mostrar que la nueva teoría es capaz de reinterpretar y explicar de manera satisfactoria otros resultados experimentales relativos a su dominio de aplicación. Además, es necesario desacreditar de alguna manera a las teorías rivales, por ejemplo, señalando que fracasan en la explicación de ciertos experimentos que se consideran explicados de manera más satisfactoria por esta nueva teoría.

De hecho, después de 1905, se propusieron otras hipótesis que permitían dar cuenta de los resultados del experimento *M-M* de una manera diferente de la de la relatividad especial. Una de ellas fue la teoría de la emisión de Ritz, formulada en 1908. Según Ritz, la luz puede concebirse como si estuviera compuesta de partículas puntuales emitidas en todas direcciones por una carga eléctrica. La velocidad de estas partículas de luz es igual a c respecto de la fuente que las emite. Sin embargo, esta velocidad no es invariante. Si la fuente se mueve con velocidad v respecto de un referencial K , la velocidad de la luz en K será igual a la suma vectorial de v y c . La teoría de Ritz, como se advierte, emplea las transformaciones de Galileo para relacionar diferentes sistemas inerciales. Esta teoría de la emisión proporciona una explicación inmediata de los

²⁴ Glymour (1980) ofrece una discusión clásica de esta cuestión. Un ejemplo típico de acomodación de evidencia previamente conocida es la explicación que ofrece la teoría de la relatividad general de la anomalía en el avance del perihelio de Mercurio. No cabe duda de que la comunidad científica la consideró como una confirmación de esta teoría. Según Brush (1989), tuvo incluso mayor valor que las otras dos pruebas clásicas, el corrimiento al rojo y la curvatura de la luz. Hay, sin embargo, una diferencia importante respecto del papel del experimento *M-M* en la relatividad especial. La teoría de la relatividad general también tuvo su origen en un problema conceptual: la incompatibilidad entre la teoría newtoniana de la gravitación y la relatividad especial, más precisamente, el hecho de que la ley de gravitación universal de Newton no era covariante respecto de las transformaciones de Lorentz. Este hecho llevó a Einstein a la búsqueda de una teoría relativista de la gravitación. Sin embargo, Einstein conocía perfectamente la anomalía del perihelio de Mercurio y la tuvo en cuenta en su larga búsqueda de las ecuaciones relativistas del campo gravitatorio. Uno de las condiciones que debían cumplir estas ecuaciones era, precisamente, explicar esta anomalía. Una carta a Conrad Habicht, en una fecha tan temprana como 1907, lo dice de manera explícita:

En este momento estoy ocupado con consideraciones sobre la teoría de la relatividad en conexión con la ley de gravitación [...] Espero aclarar los hasta ahora inexplicados cambios seculares de la longitud del perihelio de Mercurio [...] pero hasta ahora no parece funcionar (*apud* Pais, 1984, p. 190).

resultados de cualquier experimento del tipo *M-M* donde la fuente de luz es terrestre y se encuentra en reposo respecto de los instrumentos de medición. En estos experimentos, tanto la fuente de luz como los espejos están en reposo respecto del interferómetro. Por consiguiente, la velocidad de la luz es la misma en todas direcciones en el referencial asociado al aparato. Los tiempos de viaje de ida y vuelta de la luz son iguales a $2L/c$ en cada brazo del instrumento. Según ambas teorías, los fenómenos ocurrirían de la misma manera si la Tierra estuviera en reposo o en movimiento respecto del éter. En tal sentido, la teoría de Ritz también puede prescindir del éter como referencial privilegiado (cf. Ritz, 1908).

Y bien, hacia 1910, las teorías de la emisión todavía proporcionaban una explicación razonable del resultado negativo del experimento *M-M*. Tenían, además, el beneficio de que conservaban la mecánica clásica y las transformaciones de Galileo. Su debilidad consistía en que debía modificarse la teoría del electromagnetismo de Maxwell y Lorentz, porque la velocidad de la luz dependía del *movimiento* de la fuente. El propio Einstein admitió que en algún momento anterior a 1905 había considerado la posibilidad de adoptar una teoría de la emisión, pero que pronto la abandonó porque no pudo pensar “ninguna forma de ecuación diferencial que pudiera tener soluciones que representaran ondas cuya velocidad dependía del movimiento de la fuente” (cf. Shankland, 1963, p. 49). Advertimos aquí el compromiso de Einstein con la teoría ondulatoria de la luz ya que pensaba exclusivamente en términos de una teoría de la emisión de ondas. Resulta intrigante que, habiendo postulado la hipótesis de los cuantos de luz en el mismo año 1905 (de hecho, unos meses antes de redactar el artículo sobre la relatividad especial), no haya tenido en cuenta la posibilidad de una teoría corpuscular de la emisión.

Ahora bien, la teoría de la relatividad especial y la teoría de la emisión de Ritz no eran, de hecho, empíricamente equivalentes ya que predecían resultados diferentes para el caso en que la fuente de luz estuviera en movimiento relativo respecto de la Tierra. Supongamos que una fuente exterior a la Tierra, tal como el Sol, se mueve con velocidad v respecto del aparato de medición (terrestre). La relatividad especial predice que en este caso el tiempo de viaje de la luz en cada brazo del instrumento es igual a $2L/c$ en el sistema de referencia del instrumento dado que la velocidad de la luz es independiente de la velocidad de la fuente. La teoría de Ritz, en cambio, predice que el tiempo de viaje medido en el brazo del aparato alineado con la dirección del movimiento de la fuente será igual a $L/(c+v) + L/(c-v) = 2L / c(1 - v^2/c^2)^{1/2}$, lo que coincide con el cálculo de Michelson y Morley. Por consiguiente un experimento de tipo *M-M* realizado con una fuente de luz no terrestre permitiría discriminar entre ambas teorías. Según la teoría de Ritz, el experimento debería dar resultados diferentes en distintos momentos del año puesto que la velocidad de la luz debería variar debido a la combinación de los movimientos de rotación y traslación de la Tierra. Los experimen-

tos realizados por Tomaschek en 1924, utilizando luz estelar, y por Miller en 1925, empleando luz solar, dieron los mismos resultados negativos que el experimento *M-M*. Estos resultados han sido considerados, generalmente, como una evidencia desfavorable para cualquier teoría de la emisión.²⁵

7 CONCLUSIONES: LOS EXPERIMENTOS EN CONTEXTO

Los experimentos del tipo *M-M* continúan realizándose en nuestros días. En cierta manera son parte de la rutina de la ciencia contemporánea e incluso se ejecutan como prácticas de laboratorio en los cursos básicos de física. Los más sofisticados aportan un grado de precisión cada vez mayor.²⁶ Sin embargo, el contexto teórico en el que se interpretan tales experimentos ha cambiado radicalmente respecto de la época de Michelson y Morley. Ya no se consideran como intentos de medir la velocidad de la Tierra respecto del éter sino como contrastaciones de los postulados de la relatividad especial. Como señala Swenson, los físicos generalmente enseñan que el surgimiento de la relatividad ocurrió después de la caída del éter, pero los historiadores deben replicar que la caída del éter se produjo después del surgimiento de la relatividad (Swenson, 1970, p. 63).²⁷ En este contexto, las expectativas se han invertido: los resultados nulos son los que se esperan y cada uno de ellos se interpreta como una confirmación cada vez más precisa de la relatividad especial. Cualquier resultado positivo sería sorprendente ya que contradiría las predicciones de una de las teorías mejor establecidas de la

²⁵ La teoría de la emisión de Ritz constituyó una auténtica teoría rival respecto de la relatividad especial, una contrapropuesta, como la llamó Sommerfeld (Prefacio a Pauli, 1958, p. xi). Tuvo amplia repercusión alrededor de la década de 1910, siendo discutida, entre otros, por De Sitter, Ehrenfest y Tolman (véanse referencias completas en Pauli, 1958, p. 5-8). Hacia 1921, sin embargo, Pauli ya la consideraba insostenible porque, aunque explicaba el experimento *M-M*, no podía dar cuenta de otros experimentos ópticos, como, por ejemplo, el de Fizeau (Pauli, 1958, p. 9). Después de los experimentos con luz solar y estelar de Tomaschek (1924) y Miller (1925), la teoría de Ritz se consideró refutada (véanse referencias en Miller, 1933 y Shankland *et al.*, 1955). En 1965, sin embargo, J.G. Fox hizo un análisis detallado de toda la evidencia experimental contraria a las teorías de la emisión y mostró que no era concluyente antes de los experimentos con mesones realizados en 1964 (Fox, 1965, p. 16).

²⁶ El experimento *M-M* era compatible con la existencia de un viento de éter de $1/6 v$, dado que este era el umbral de precisión de sus instrumentos. Los experimentos posteriores fueron reduciendo cada vez más este umbral. En el de Cedarholm *et al.* (1958) la velocidad máxima del posible viento de éter se redujo a $1/1000 v$. En los experimentos con luz láser, como el de Brillat & Hall (1979), o el más reciente de Müller *et al.* (2003) este umbral de v se redujo en un factor de 4.000 y 12.000, respectivamente. Es evidente que si estos experimentos dieran un resultado positivo, éste no podría atribuirse a un efecto del movimiento terrestre ya que se trataría de fracciones minúsculas de la velocidad orbital de la Tierra.

²⁷ De hecho, los experimentos para detectar el viento de éter continuaron realizándose hasta la década de los '30. Para un relato detallado de estos experimentos, véase Swenson (1972).

física. En la actualidad, una diferencia de una parte en un millón en las mediciones de la velocidad de la luz en diferentes direcciones, muy probablemente pondría en crisis a la teoría de la relatividad especial puesto que conduciría a un cuestionamiento de la invariancia de la velocidad de la luz. Esta hipótesis no surgió, según vimos, como producto de observaciones o experimentos sino que, por el contrario, se la empleó para explicarlos. La “refutación” de esta hipótesis implicaría una reinterpretación drástica de muchos otros experimentos.

Hemos visto las diferentes interpretaciones que el experimento $M-M$ recibió antes y después de 1905. Si imaginamos ahora un contexto histórico diferente, un experimento del tipo $M-M$ podría haberse interpretado como la refutación de por lo menos alguna de las hipótesis auxiliares que son comunes a todas las interpretaciones de este experimento posteriores a 1887. Recordemos, a tal efecto, nuestra discusión acerca de los distintos tipos de presupuestos que operan en la interpretación de una experiencia.

La hipótesis de un movimiento orbital de la Tierra, por ejemplo, era compartida por todas las interpretaciones que hemos comentado y se consideraba fuera de toda duda razonable. A la luz de todo lo que se ha discutido, preguntémonos, entonces, qué habría ocurrido si un experimento de esa clase se hubiera realizado en un momento histórico en que dicha hipótesis no se consideraba todavía confirmada. La pregunta es razonable si tenemos en cuenta el desarrollo independiente que ha tenido el electromagnetismo respecto de la mecánica, lo que nos permite suponer que, en principio, un experimento del tipo $M-M$ podría haberse llevado a cabo en el siglo XVII (o sea cuando estaba en plena discusión la hipótesis del movimiento de la Tierra) bajo condiciones experimentales análogas a las de fines del siglo XIX. O sea, en principio un experimento del tipo $M-M$ era realizable en el contexto de la teoría ondulatoria de la luz de Huygens y el resultado nulo del experimento se habría interpretado, de manera natural, como la confirmación de la hipótesis de que la Tierra se encontraba en *reposo* absoluto respecto del éter luminífero.²⁸

Ya la medición por parte de Römer en 1676 (cf. Römer, 1676) de la velocidad de la luz atendiendo al retardo de los eclipses del satélite Io al pasar por detrás de Júpiter, *presuponía* el movimiento orbital de la Tierra. En efecto, el máximo retardo en la iniciación del eclipse se suponía producido por el hecho de que la Tierra y Júpiter se hallaban a una distancia máxima, por lo que la luz debía recorrer el diámetro de la órbita terrestre empleando el mayor tiempo adicional. Sin embargo, el fenómeno era compatible con un sistema del tipo de Tycho Brahe e incluso con el de Ptolomeo. Tycho Brahe no observó el fenómeno ya que no disponía del telescopio (el descubrimiento de Io fue

²⁸ Alguna vez Feyerabend vislumbró este hecho (cf. Feyerabend, 1984, p. 118); sin embargo, no lo ha desarrollado ni tampoco, según creemos, ha reparado en su enorme importancia.

anunciado por Galileo en 1610), pero podía haberlo explicado atribuyéndole el retardo al diámetro del epiciclo de Júpiter *centrado* en el Sol (que a su vez orbitaba en torno de la Tierra). Respecto del sistema de Ptolomeo podía haberse supuesto que el epiciclo de Júpiter era del tamaño de la órbita copernicana de la Tierra. Por supuesto, estas hipótesis auxiliares hubiesen requerido de ajustes en las correspondientes teorías.

La primera experiencia que se consideró como evidencia observacional del movimiento orbital de la Tierra recién fue ofrecida a partir de la interpretación de la aberración de la luz estelar por parte de Bradley en 1728, fenómeno que atribuyó al movimiento terrestre. Recordemos que Bradley buscaba la paralaje de una estrella con el objetivo de medir, precisamente, la velocidad orbital de la Tierra: quería determinar la elipse kepleriana aparente descrita por una estrella a lo largo del año. Pero halló, por una parte, que la forma como se trazaba la elipse no era la esperada en relación con las diferentes velocidades y direcciones del movimiento de la Tierra, y, por otra, que todas las estrellas describían elipses cuyo semieje mayor era independiente de su distancia. Bradley interpretó, entonces, que el efecto no se debía a la posición de la estrella respecto de la Tierra (distancia, ubicación sobre la eclíptica, etc.) sino a su velocidad aparente; es más, la paralaje buscada quedaba oculta (y recién fue medida por Bessel más de un siglo después, en 1838). ¿No podía haberse interpretado este fenómeno suponiendo que todas las estrellas estaban sobre una misma bóveda y que ésta se movía de manera elíptica?

Notemos, de paso, el enorme peso adquirido por la teoría ondulatoria de la luz, sobre todo a partir de 1801 con el fenómeno de interferencia estudiado por Young. Einstein resolvió el problema del éter, sosteniendo hasta sus últimas consecuencias la teoría electromagnética *ondulatoria* de Maxwell en la que la velocidad de una onda no dependía de la velocidad de la fuente. Así, la aberración de la luz, dificultosamente interpretada a partir de la teoría ondulatoria a lo largo de todo el siglo XIX, no fue suficiente para revelar, como sí lo fue para Einstein el efecto fotoeléctrico en el mismo año de 1905, que la luz podía tener un comportamiento corpuscular.

Finalmente, podrían imaginarse otras situaciones posibles en el mismo contexto histórico en el que Michelson comenzó sus experimentos. Si la hipótesis de la contracción de Lorentz se hubiera formulado antes del primer experimento de interferencia de Michelson, por ejemplo, en el marco de una discusión acerca de si la densidad de la materia dependía de su estado de movimiento, la teoría de Lorentz podría haber sido la hipótesis que se buscaba contrastar. Ella hubiese requerido de alguna teoría atómica aceptable. En consecuencia, más tarde, el resultado del experimento *M-M* se habría interpretado en el marco de dicha teoría atómica y se lo habría considerado como la confirmación de la hipótesis de que las longitudes de los cuerpos se contraían con el movimiento. Desde este punto de vista, el objetivo del experimento no hubiese sido la

determinación de la velocidad absoluta de la Tierra respecto del éter; menos aún, la medición de la invariancia de la velocidad de la luz.

Todo experimento se realiza sobre la base de un conjunto muy amplio de presupuestos teóricos. Cuáles de ellos se consideren como la hipótesis que el experimento se propone contrastar y cuáles como meras hipótesis auxiliares que no se ponen a prueba, es algo que depende del consenso alcanzado en un momento histórico determinado. En un contexto diferente, dicho consenso podría cambiar de tal manera que el experimento adquiriera un significado completamente distinto. Por ejemplo, podría ocurrir que se intercambie el papel de las hipótesis auxiliares de modo que alguna de ellas, antes considerada bien establecida, tome el lugar de la hipótesis principal que se pone a prueba en el experimento. Esto es así, hasta el punto que un mismo experimento – en particular el de Michelson y Morley – puede, según el contexto, considerarse como un experimento atinente a un fenómeno astronómico, mecánico, electromagnético, puramente óptico o incluso atómico.

Para comprender, entonces, el impacto que históricamente tuvo el artículo de Einstein de 1905, debemos contextualizarlo; o sea, entender qué hipótesis auxiliares eran aceptadas y cuáles los fenómenos que se consideraba que debían explicarse. La relatividad especial consiguió una síntesis de virtudes epistémicas diferentes. Minimizando el número de postulados – enunciados que, por definición, no requieren ser explicados – y adoptando algunas hipótesis auxiliares, obtuvo, mediante esos pocos elementos, un admirable poder explicativo y simplicidad. En el momento en que Einstein la formuló, era la única explicación del experimento *M-M* que resultaba compatible con todos los fenómenos conocidos acerca de la propagación de la luz, como la aberración estelar, el experimento de Fizeau y muchos otros.²⁹ También, a diferencia de otras alternativas teóricas, mantuvo su adecuación empírica respecto de todos los experimentos ópticos y electromagnéticos realizados después de 1905 y hasta la actualidad. Por ello, la aceptación de la relatividad especial puede atribuirse a la confluencia de tres virtudes: haber sido presentada en el momento preciso en que se reconocía un conflicto aparentemente insoluble entre la mecánica y el electromagnetismo; haberse formulado *acceptando* simplemente como hechos básicos ciertos fenómenos sobre la propagación de la luz que hasta entonces se había tratado infructuosamente de explicar y, por último, haber servido como marco explicativo para todos los fenómenos ópticos y electromagnéticos conocidos.

²⁹ Advirtamos la reinterpretación por parte de la relatividad especial de los diferentes experimentos ópticos. Por ejemplo, la fórmula de Fresnel para calcular la velocidad de la luz en medios refringentes en movimiento se deduce de la transformación relativista de velocidades, pero ya no se interpreta como producto del arrastre del éter.

En principio, un resultado experimental nunca queda establecido de manera definitiva. Es perfectamente posible que en el futuro el experimento *M-M* se interprete sobre la base de una teoría completamente diferente de la relatividad especial y se considere, por ejemplo, que no tiene relación alguna con la invariancia de la velocidad de la luz ni con alguno de los postulados de Einstein, sino con alguna propiedad todavía desconocida de la luz. La explicación relativista emplea, como cualquier otra, un amplio conjunto de presupuestos que se dan por establecidos hasta el momento presente pero no podemos determinar si se han de seguir aceptando en el futuro. Hacking ha sostenido que el resultado del experimento *M-M* constituye uno de esos “hechos permanentes acerca de los fenómenos que cualquier teoría futura debe acomodar” (Hacking, 1983, p. 254). Esto fue indudablemente cierto para Lorentz, Einstein o Ritz, y todavía lo es en nuestros días. Sin embargo, por las razones que acabamos de exponer, no podemos aceptar la independencia de los hechos experimentales respecto de toda teoría interpretativa. Es posible que en el futuro, en un contexto teórico enteramente diferente del actual, el resultado del experimento *M-M* no sea considerado un hecho que haya que explicar o acomodar, o ni siquiera aparezca conceptualizado como un hecho en absoluto. ♣

Agradecemos a Rafael Ferraro y a Michel Paty sus observaciones y comentarios a una versión anterior de este trabajo

Alejandro CASSINI

Universidad de Buenos Aires-CONICET, Argentina

alecass@movicombs.com.ar

Leonardo LEVINAS

Universidad de Buenos Aires-CONICET, Argentina

Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE), Argentina

leo@levinas.com.ar

ABSTRACT

We attempt to elucidate how different theoretical assumptions bring about radically different interpretations of the same experimental result. In order to do it, we analyze Einstein's special relativity as it was originally formulated in 1905. We then examine its singular relation with the result of the 1887 Michelson-Morley experiment. We point out that in diverse historical contexts one and the same experiment can be thought of as providing different – often incompatible – conceptualizations of phenomena. This permits us to show why special relativity prevailed over its rival theories. Einstein's theory made possible a new reinterpretation of Michelson-Morley experiment by relating it with a novel phenomenon, namely, the invariance of the speed of light, which was not the one originally investigated in that experiment. This fact enables us to answer the question about how this experiment could have been interpreted in a completely different historical context, such as seventeenth-century science, when Earth's orbital motion was still a questionable hypothesis.

KEYWORDS • Michelson-Morley experiment. Postulates of special relativity. Historical context of the experiment. Assumptions and auxiliary hypotheses.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIRY, G. B. On a supposed alteration in the amount of astronomical aberration of light produced by the passage of the light through a considerable thickness of refracting medium. *Proceedings of the Royal Society*, London, A20, p. 35-9, 1871.
- ARAGO, F. Mémoire sur la vitesse de la lumière, lu à la première classe de l'Institut, le 10 décembre 1810. *Comptes Rendues de l'Académie des Sciences*, Paris, 36, p. 38-49, 1853.
- BALIBAR, F. *Einstein 1905: de l'éther aux quanta*. Paris: PUF, 1992.
- BOHM, D. *The special theory of relativity*. New York: Benjamin, 1965.
- BORN, M. *Einstein's theory of relativity*. New York: Dover, 1962 [1920].
- BRADLEY, J. A letter from the Reverend Mr. James Bradley Savilian Professor of Astronomy at Oxford and F.R.S. to Dr. Edmund Halley giving an account of a new discovered motion of the fixed stars. *Philosophical Transactions of the Royal Society (London)*, 35, p. 637-61, 1728.
- BRIDGMAN, P. W. *A sophisticate's primer of relativity*. New York: Harper & Row, 1965 [1962].
- BRILLET, A. & HALL, J. L. Improved laser test of the isotropy of space. *Physical Review Letters*, 42, p. 549-52, 1979.
- BRUSH, S. Prediction and theory evaluation: the case of light bending. *Science*, 246, p. 1124-29, 1989.
- CABRERA, B. *Principio de relatividad: sus fundamentos experimentales y filosóficos y su evolución histórica*. Madrid: Publicaciones de la Residencia de Estudiantes, 1923.
- CEDARHOLM, J.; BLAND, G.; HAVENS, B. & TOWNES, C. New experimental test of special relativity. *Physical Review Letters*, 1, p. 342-3, 1958.
- COUGHLAN, G. & DODD, J. *The ideas of particle physics: an introduction for scientists*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991 [1984].
- DUHEM, P. Quelques réflexions au sujet de la physique expérimentale. *Revue des Questions Scientifiques*, 36, p. 179-229, 1894.
- . *La théorie physique: son objet – sa structure*. Paris: Chevalier et Rivière, 1914 [1906].
- EINSTEIN, A. *Über die spezielle un die allgemeine Relativitätstheorie, gemeinverständlich*. Braunschweig: Vieweg, 1917.

- _____. A brief outline of the development of the theory of relativity. *Nature*, 106, p. 782-4, 1921.
- _____. Fundamental ideas and problems of the theory of relativity. *Les Prix Nobel 1922*. Stockholm: Almqvist & Wiksell, p. 482-90, 1923.
- _____. Autobiographisches. In: SCHILPP, P. A. (Ed.). *Albert Einstein: philosopher-scientist*. La Salle: Open Court, 1949. p. 1-24. (The Library of Living Philosophers).
- _____. Was ist Relativitätstheorie? In: _____. *Mein Weltbild*. Zurich: Europa-Verlag, 1980 [1919]. p. 127-31.
- _____. *Mein Weltbild*. Zurich: Europa-Verlag, 1980 [1934].
- _____. How I created the theory of relativity (Kyoto lecture 1922). *Physics Today*, 35, 8, p. 45-7, 1982 [1922].
- _____. Sobre la electrodinámica de los cuerpos em movimiento. In: STACHEL, J. (Ed.). *Einstein 1905: un año milagroso*. Barcelona: Crítica, 2001 [1905]. p. 111-43.
- _____. *Obra esencial*. Barcelona: Crítica, 2005.
- _____. Éter y teoría de la relatividad. In: _____. *Obra esencial*. Barcelona: Crítica, 2005 [1920]. p. 135-45.
- _____. Las ideas fundamentales y los métodos de la teoría de la relatividad segundo su desarrollo. In: _____. *Obra esencial*. Barcelona: Crítica, 2005 [1920]. p. 146-90.
- ELLIS, G. F. R. & WILLIAMS, R. *Flat and curved space-times*. Oxford: Clarendon Press, 1988.
- FERRARO, R. & SFORZA, D. Arago, 1810: the first experimental result against the ether. *European Journal of Physics*, 26, p. 195-204, 2005.
- FEYERABEND, P. *Adiós a la razón*. Madrid: Tecnos, 1984.
- FIZEAU, A. H. L. Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur. *Comptes Rendues de l'Académie des Sciences*, Paris, 33, p. 349-55, 1851.
- FITZGERALD, G. The ether and the Earth's atmosphere. *Science*, 13, p. 390, 1889.
- FOX, J. G. Evidence against emission theories. *American Journal of Physics*, 33, p. 1-17, 1965.
- FRENCH, A. P. *Special relativity*. New York: Norton, 1968.
- FRESNEL, A. J. Lettre d'Augustin Fresnel à François Arago, sur l'influence du mouvement terrestre dans quelques phénomènes d'optique. *Annales de Chimie et de Physique*, 9, p. 57-66, 1818.
- GILLIES, D. The Duhem thesis and the Quine thesis. In: _____. *Philosophy of science in the twentieth century: four central themes*. Oxford: Blackwell, 1993. p. 98-116.
- GLYMOUR, C. *Theory and evidence*. Princeton: Princeton University Press, 1980.
- GRÜNBAUM, A. The falsifiability of the Lorentz-Fitzgerald contraction hypothesis. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 10, p. 48-50, 1959.
- HACKING, I. *Representing and intervening: Introductory topics in the philosophy of natural science*. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
- HANDSCHY, M. A. Re-examination of the 1887 Michelson-Morley experiment. *American Journal of Physics*, 50, p. 87-90, 1982.
- HARRISON, E. *Cosmology: the science of the universe*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000 [1981].
- HOLTON, G. Einstein, Michelson and the 'crucial' experiment. *Isis*, 60, p. 132-97, 1969.
- ITAGAKI, R. Einstein's 'Kyoto lecture': the Michelson-Morley experiment. *Science*, 283, p. 1457-8, 1999.
- JAFFE, B. *Michelson and the speed of light*. New York: Doubleday, 1960.
- JANSSEN, M. & STACHEL, J. The optics and electrodynamics of moving bodies. Disponible en: <www.mpiwg-berlin.mpg.de/en/forschung/Preprints/P265.PDF> Acceso en: 2004. (Stachel, J. *Going critical: the challenge of practice*. Dordrecht: Kluwer, en prensa.)
- KENNEDY, R. & THORNDIKE, E. Experimental establishment of the relativity of time. *Physical Review*, 42, p. 400-18, 1932.
- LANDAU, L. D. & LIFCHITZ, L. *Théorie des champs*. Moscou: MIR, 1970.
- LAYMON, R. Independent testability: the Michelson-Morley and the Kennedy-Thorndike experiments. *Philosophy of Science*, 47, p. 1-37, 1980.

- LORENTZ, A. H. De l'influence du mouvement de la Terre sur les phénomènes lumineux. *Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles*, 9, p. 103-76, 1887 [1886].
- MASCART, E. Sur les modifications qu'éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l'observateur (deuxième partie). *Annales Scientifiques de l'École Normale Supérieure*, 3, p. 363-420, 1874.
- MICHELSON, A. The relative motion of the Earth and the luminiferous ether. *American Journal of Science*, 22, p. 120-9, 1881.
- _____. Sur le mouvement relatif de la Terre et de l'éther. *Comptes Rendues de l'Académie des Science*, Paris, 94, p. 520-3, 1882.
- MICHELSON, A. & MORLEY, E. Influence of motion of the medium on the velocity of light. *American Journal of Science*, 31, p. 377-86, 1886.
- _____. & _____. On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether. *American Journal of Science*, 34, p. 333-45, 1887.
- MILLER, D. C. Ether-drift experiments at Mount Wilson. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 11, p. 306-14, 1925.
- _____. The ether-drift experiment and the determination of the absolute motion of the earth. *Review of Modern Physics*, 5, p. 203-42, 1933.
- MILLS, R. *Space, time and quanta: an introduction to contemporary physics*. New York: Freeman, 1994.
- MØLLER, C. *The theory of relativity*. Oxford: Clarendon Press, 1952.
- MÜLLER, H.; HERRMANN, S.; BRAXMAIER, C.; SCHILLER, S. & PETERS, A. Modern Michelson-Morley experiment using cryogenic optical resonators. *Physical Review Letters*, 91, p. 020401, 2003.
- PAIS, A. *Subtle is the Lord. The science and the life of Albert Einstein*. Oxford: Clarendon Press, 1982. (Traducción española: 'El Señor sutil...'. *La ciencia y la vida de Albert Einstein*. Barcelona: Ariel, 1984).
- PATY, M. *Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique*. Paris: PUF, 1993.
- _____. Les trois stades du principe de relativité. *Revue des Questions Scientifiques*, 170, p. 103-50, 1999.
- PAULI, W. *Theory of relativity*. London: Pergamon Press, 1958 [1921].
- POPPER, K. R. *The logic of scientific discovery*. London: Routledge, 1992.
- QUINE, W. V. O. *Pursuit of truth*. Revised edition. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1992 [1990].
- RESNICK, R. *Introduction to special relativity*. New York: Wiley, 1968.
- RITZ, W. Recherches critiques sur l'électrodynamique générale. *Annales de Chimie et de Physique* 8, 13, p. 145-275, 1908.
- RÖMER, O. Démonstration touchant le mouvement de la lumière. *Journal des Savants*, 7, p. 233-6, 1676.
- SARTORI, L. *Understanding relativity: a simplified approach to Einstein's theories*. Berkeley/Los Angeles/London: University of California Press, 1996.
- SCHILPP, P. A. (Ed.). *Albert Einstein: philosopher-scientist*. La Salle: Open Court, 1949.
- SCHUMACHER, R. Special relativity and the Michelson-Morley experiment. *American Journal of Physics*, 62, p. 609-12, 1994.
- SCHUTZ, B. F. *A first course in general relativity*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993 [1985].
- SHADOWITZ, A. *Special relativity*. New York: Dover, 1988 [1968].
- SHANKLAND, R. S. Conversations with Albert Einstein. *American Journal of Physics*, 31, p. 47-57, 1963.
- _____. Michelson-Morley experiment. *American Journal of Physics*, 32, p. 16-35, 1964.
- _____. Conversations with Albert Einstein. II. *American Journal of Physics*, 41, p. 895-901, 1973.
- SHANKLAND, R. S.; McCUSKEY, S. W.; LEONE, F. C. & KUERTI, G. New analysis of the interferometer observations of Dayton C. Miller. *Review of Modern Physics*, 27, p. 167-178, 1955.
- SMITH, J. H. *Introduction to special relativity*. New York: Dover, 1995 [1965].
- STACHEL, J. Einstein and Michelson: The context of discovery and the context of justification. *Astronomische Nachrichten*, 303, p. 47-53, 1982.

- _____. (Ed.). *Einstein 1905: Un año milagroso*. Barcelona: Crítica, 2001.
- STOKES, G. G. On the aberration of light. *Philosophical Magazine*, 27, p. 9-15, 1845.
- SWENSON, L. S. The Michelson-Morley-Miller experiments before and after 1905. *Journal for the History of Astronomy*, 1, p. 56-78, 1970.
- _____. *The ethereal aether: a history of the Michelson-Morley-Miller aether-drift experiments, 1880-1930*. Austin: University of Texas Press, 1972.
- TAYLOR, E. F. & WHEELER, J. A. *Spacetime physics. Introduction to special relativity*. New York: Freeman, 1992 [1963].
- TOMASCHEK, R. Über das Verhalten des Lichtes ausserirdischer Lichtquellen. *Annalen der Physik*, 73, p. 105-26, 1924.
- TORRETTI, R. *Relativity and geometry*. New York: Dover, 1996 [1983].
- WALD, R. M. *Space, time and gravity: the theory of the big bang and black holes*. Second edition. Chicago: University of Chicago Press, 1992 [1977]. (Traducción española: *Espacio, tiempo y gravitación. La teoría del "Big Bang" y los agujeros negros*. México: Fondo de Cultura Económica, 1998.)
- WEYL, H. *Space-time-matter*. New York: Dover, 1952 [1921].
- YOUNG, T. Experiments and calculations relative to physical optics. *Philosophical Transactions of the Royal Society (London)*, 94, p. 1-14, 1804.
- ZAHAR, E. *Einstein's revolution: a study in heuristics*. La Salle, Illinois: Open Court, 1989.