

EL EXPERIMENTO CRUCIAL DE GALILEO: UN ANÁLISIS EPISTEMOLÓGICO

ALEJANDRO CASSINI

Universidad de Buenos Aires -CONICET

Resumen

En los *Discorsi* Galileo afirma haber realizado un experimento, cuyo resultado fue negativo, para determinar si la luz tarda tiempo en propagarse. En este trabajo analizo ese experimento como crucial entre las hipótesis rivales según las cuales la luz se propaga con velocidad infinita o con velocidad finita. Procuro determinar las hipótesis auxiliares y la carga teórica que presupone el diseño experimental. Argumento que las hipótesis presupuestas son razonables y que la carga teórica es muy baja. Sostengo que en principio es posible un experimento crucial exitoso, esto es, con resultado positivo, como el concebido por Galileo. Concluyo que la hipótesis de que la luz se propaga con velocidad finita no es refutable mediante un experimento de esta clase, por lo cual cualquier resultado negativo es compatible con ambas hipótesis rivales. Como consecuencia de ello, la hipótesis de que la luz, o cualquier otra interacción física, se propagan con velocidad infinita resulta inverificable.

PALABRAS CLAVE: Velocidad de la luz; Experimento crucial; Hipótesis auxiliares; Carga teórica.

Abstract

In his *Discorsi*, Galileo claims to have performed an experiment to determine whether light takes time in propagating from one place to another. In this paper I take that experiment as crucial between the rival hypotheses of finite and infinite speed of light. I contend that, in spite of Galileo's negative result, such a crucial experiment is possible, both in principle and in practice. I then argue that it employs reasonable auxiliary hypotheses. I conclude that a positive result in a Galileo-type experiment would refute the hypothesis of instantaneous propagation of light and verify the hypothesis of finite velocity. However, a negative result is always compatible with the two rivals, and consequently, the hypothesis of finite velocity is not refutable by any possible experience.

KEY WORDS: Speed of Light; Crucial Experiment; Auxiliary Hypotheses; Theory-Ladenness.

1. Introducción

Los experimentos cruciales fueron concebidos a principios del siglo XVII como medio para decidir entre teorías rivales. La finalidad de

esta clase de experimentos era contrastar simultáneamente dos hipótesis o teorías rivales, de modo tal que, si el experimento resultaba exitoso, una de las dos debía ser refutada. Ronald Giere ha dicho al respecto que “La idea de un ‘experimento crucial’, tal como fue expuesta, por ejemplo, por Francis Bacon, fue un logro mayor de la Revolución Científica. Merece ubicarse al mismo nivel que otros logros como el cálculo, el telescopio y la bomba de vacío” (Giere 1999, p. 124). Posiblemente, Giere sobreestime la importancia de los experimentos cruciales al compararla con la del cálculo o la del telescopio, pero no cabe duda de que se trató de un aporte fundamental y permanente al acervo de los métodos de las ciencias empíricas.

Uno de los primeros experimentos cruciales de los que tenemos noticias aparece en la última obra de Galileo, los *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno à due nuove scienze*, publicada en 1638, donde se afirma que fue efectivamente realizado. La finalidad del experimento era determinar si la luz tardaba algún tiempo en propagarse de un lugar a otro o si se propagaba de manera instantánea. Galileo se proponía confirmar su propia conjetura según la cual la velocidad de la luz era finita y, por consiguiente, la luz debía tardar un cierto tiempo, en principio observable, para recorrer una distancia relativamente grande. El resultado fue negativo, es decir, no se observó ninguna demora en el tiempo de propagación de la luz, por lo que la cuestión quedó indeterminada. El experimento crucial fracasó, pero, como trataré de mostrar en lo que sigue, tanto el diseño experimental como el resultado negativo permiten extraer importantes conclusiones epistemológicas.

El objetivo de este trabajo es hacer un análisis epistemológico del experimento de Galileo y extenderlo a todos los experimentos del mismo tipo. Intentaré determinar cuáles son los resultados posibles de esta clase de experimentos, cuáles son las hipótesis auxiliares presupuestas y cuál es la carga teórica implicada en el diseño experimental. Señalaré que es razonable suponer que las hipótesis auxiliares son aceptables y que la carga teórica es muy limitada. Concluiré de este análisis que la hipótesis de que la luz se propaga con una velocidad finita no es refutable por ningún experimento posible. No obstante, argumentaré que era posible, aunque no técnicamente realizable, que un experimento del tipo concebido por Galileo resultara exitoso como experimento crucial y refutara la hipótesis de que la luz se propaga de manera instantánea, esto es, con una velocidad infinita.

2. El debate sobre la velocidad de la luz

La velocidad de la luz en nuestros días se conoce con certeza. En 1983 se estableció que la luz se mueve en el vacío a una velocidad de 299.792.458 metros por segundo. A partir de esta velocidad se definió convencionalmente la longitud del metro como la distancia que la luz recorre en $1/299.972.458$ segundos. Puede decirse que el largo proceso histórico de la medición de la velocidad de la luz se encuentra concluido y que conocemos el valor de la constante c más allá de toda duda razonable.¹

La situación era muy diferente a comienzos del siglo XVII. En ese momento, todavía no se había ideado ningún experimento para medir el valor de la velocidad de la luz en ningún medio transparente. Las opiniones de los filósofos, ya desde la Antigüedad, se hallaban divididas respecto de esta cuestión. La observación cotidiana revelaba que la luz se movía de manera extremadamente rápida en relación con la percepción humana, ya que no era posible advertir ninguna demora en el desplazamiento de los rayos luminosos. Por ejemplo, cuando se enciende una lámpara dentro de una habitación, todas las paredes parecen iluminarse simultáneamente. Lo mismo ocurre, involucrando distancias mucho mayores, cuando amanece: todos los objetos dentro del horizonte visual parecen recibir la luz solar de manera instantánea. A partir de este tipo de experiencias, sin embargo, no puede inferirse ningún valor concreto para la velocidad de la luz. Lo único que se sigue de ellas es que dicha velocidad es alta y que se halla por debajo del umbral de la percepción humana dentro de distancias relativamente cortas, comparadas, por ejemplo, con las distancias astronómicas como las que separan al Sol de la Tierra.

Cualquiera de las experiencias que hemos citado es, en principio, compatible con la hipótesis de que la velocidad de la luz sea infinita y se propague de manera instantánea de un lugar a otro, pero también con la hipótesis de que la velocidad sea finita y, por consiguiente, que la luz requiera un tiempo finito para propagarse por el espacio. A lo largo de la historia los filósofos apoyaron con toda clase de argumentos teóricos una u otra de estas hipótesis rivales. Considerados retrospectivamente, todos

¹ La resolución se tomó en la *XVII Conférence Générale des Poids et Mesures*. Desde ese momento el valor de la velocidad de la luz en el vacío quedó por convención establecido de manera exacta. El valor adoptado es el que había sido recomendado, sobre la base de la concordancia de los resultados experimentales, en la *XV Conférence* realizada en 1975.

esos argumentos son inconcluyentes y no permiten decidir la cuestión. Se trata, en efecto, de un problema empírico, que solo puede resolverse mediante alguna forma de experiencia controlada. Hasta donde llega nuestro conocimiento, nadie intentó realizar tal experiencia antes que Galileo. La manera de contrastar dos hipótesis empíricas rivales es, por supuesto, realizar un experimento crucial entre ellas. Aunque el experimento de Galileo tuvo un resultado negativo, resulta altamente significativo tanto desde un punto de vista histórico como epistemológico. En efecto, es uno de los primeros experimentos cruciales de los que se tiene noticia en la historia de la ciencia. De hecho, es contemporáneo con la noción misma de experimento crucial, propuesta por Francis Bacon en su *Novum organum* (II, 36), a pesar de que el propio Bacon no empleó este término, sino el de *instantia crucis*, que literalmente significa “instancia de la cruz”.²

No es mi objetivo en este trabajo hacer una reseña histórica, ni siquiera sumaria, de los diferentes argumentos a favor de la propagación instantánea de la luz que los filósofos, desde Aristóteles hasta Descartes y Kepler, inventaron. Tampoco me ocuparé de los respectivos contraargumentos ofrecidos por otros filósofos.³ Solo haré algunas observaciones para situar el problema.

Aristóteles atribuyó a Empédocles la tesis de que la luz tarda un determinado tiempo en propagarse desde el Sol hasta la Tierra (*De anima* 418b21; *De sensu* 446a26). Pero el propio Aristóteles consideró que esta idea, si bien plausible, no era correcta. La experiencia muestra, según Aristóteles, que la luz del Sol no tarda tiempo en propagarse de Este a Oeste (*De anima* 418b25). La razón de ello es, según él, que la luz no es un cuerpo sujeto al movimiento local, sino una suerte de cambio cualitativo que acontece de manera simultánea en lugares diferentes. En sentido estricto, entonces, la luz no se propaga. No obstante, la iluminación es un tipo de cambio que ocurre de manera instantánea. Aristóteles lo comparó con el fenómeno del calentamiento o el congelamiento del agua, que, según cree, se produce al mismo tiempo en toda su extensión (*De sensu* 446b28-447a3).⁴

² Véase Lohne (1968), que contiene mucha información histórica sobre los orígenes de la noción de experimento crucial.

³ Ronchi (1938/1983) es una obra general panorámica, todavía útil, aunque ya anticuada en muchos aspectos. Sabra (1967/1981) es más detallada sobre las teorías de la luz en el siglo XVII. La obra compilada por Taton (1978) contiene mucha información específica sobre la historia de la velocidad de la luz.

⁴ La analogía es errónea, desde el punto de vista actual, ya que sabemos que tanto el calentamiento como la cristalización son procesos que tardan tiempo en propagarse desde una parte a otra de un cuerpo o sustancia.

Todos los representantes de la tradición aristotélica defendieron la hipótesis de que la luz se propaga de manera instantánea y que, por consiguiente, su velocidad es infinita. Tomás de Aquino, por ejemplo, empleó este hecho, que daba por descontado, como analogía con la acción creadora del mundo por parte de Dios. Según este argumento, la causa (Dios) puede ser simultánea con el efecto (el mundo creado) así como la fuente de luz es simultánea con las cosas iluminadas. Por consiguiente, el mundo puede ser tan eterno como Dios mismo.⁵

Descartes, contrariamente a Aristóteles, admitió que la luz era alguna suerte de movimiento, pero que, sin embargo, se propagaba de manera instantánea de un lugar a otro del espacio. Para ilustrar este hecho se valió también de una analogía: cuando se mueve el extremo de un bastón, el otro extremo también se mueve de manera inmediata; del mismo modo, la luz solar extiende sus rayos de manera instantánea hacia nosotros (Descartes 1637, p. 84).⁶

Unos pocos filósofos medievales, como Alhazen en el siglo XI, Guillermo de Conches en el siglo XII y Roger Bacon en el siglo XIII, habían sostenido que la velocidad de la luz debía ser finita. Un argumento corriente era que si la luz es una sustancia material, un cuerpo o un agregado de cuerpos, debe tardar un tiempo en pasar de un lugar a otro, como lo hacen los cuerpos que observamos en nuestra experiencia. La diferencia es que la velocidad de la luz, si bien finita, debe de ser lo suficientemente alta como para que no seamos capaces de percibir la demora cuando recorre distancias cortas. La dificultad con este argumento es que presupone que la luz es un cuerpo y que los cuerpos no pueden ser acelerados hasta alcanzar velocidades infinitas. Ninguno de estos dos supuestos podía considerarse justificado ni tenía a su favor ninguna evidencia experimental. Solo se basaban en la extrapolación de las experiencias corrientes de la percepción humana sobre distancias terrestres.⁷

⁵ Este argumento se encuentra en el breve opúsculo *De aeternitate mundi*, escrito hacia 1270. Es un trabajo sumamente interesante, además, como precursor de las antinomias kantianas. Tomás defiende allí que, desde el punto de vista de la razón, el universo podría ser tanto eterno como de duración finita.

⁶ La analogía también es errónea. Sabemos que el movimiento de las partes del bastón es sucesivo y requiere tiempo. El movimiento comunicado a un extremo se propaga hasta el otro como una onda de choque con velocidad finita.

⁷ De hecho, en toda la física anterior a la teoría de la relatividad especial no existe ninguna ley que prohíba la existencia de partículas o cuerpos que se muevan con una velocidad infinita.

A principios del siglo XVII la cuestión de la velocidad de la luz seguía sin haberse decidido entre las dos hipótesis rivales de la velocidad infinita o la velocidad finita, que en ese momento todavía se denominaban *propagación instantánea* y *propagación sucesiva*, respectivamente. El problema estaba planteado en términos del tiempo de propagación empleado por la luz en recorrer una distancia finita. Si la propagación de la luz fuera instantánea y, por consiguiente, la velocidad fuera infinita, el tiempo debería ser nulo, cualquiera fuese la distancia recorrida. En cambio, si la propagación fuera sucesiva, el tiempo debería variar proporcionalmente a la distancia recorrida y solo sería nulo en el caso límite de que la distancia misma fuera nula. El problema, así planteado, no parece que pudiera resolverse mediante ningún argumento ni experimento mental. Al contrario, resulta una cuestión empírica que, en principio al menos, podría decidirse mediante un experimento que midiera el tiempo empleado por la luz en recorrer una distancia previamente conocida. Dicha experiencia también proporcionaría una *medición indirecta* de la velocidad de la luz, que podría ser calculada a partir de la distancia recorrida y el tiempo medido.

3. El experimento crucial de Galileo

Hasta donde sabemos, Galileo era uno de los pocos sabios de comienzos del siglo XVII que no estaba convencido de que la luz se propagara de manera instantánea. Galileo, mostrando el espíritu experimentalista que caracterizó, al menos en parte, a la revolución científica del siglo XVII, pensó que la cuestión no podía resolverse mediante argumentos, sino por medio de la experiencia. En un pasaje de los *Discorsi* discutió el problema de la velocidad de la luz y volvió a analizar la evidencia empírica disponible a favor de la hipótesis de la propagación instantánea.⁸ En el curso del diálogo, Salviati, el portavoz de la posición del propio Galileo, se deshace fácilmente de argumentos tradicionales como el que afirma que la propagación de la luz debe ser instantánea porque cuando se dispara un cañón a distancia vemos inmediatamente el fogonazo de la explosión y solo un poco después escuchamos el estruendo del disparo. Salviati replica, correctamente, que

⁸ Dicho pasaje se encuentra en las páginas 42-44 de la edición original de 1638 y en las páginas 87-89 del volumen VIII de la *Edizione Nazionale* a cargo de Antonio Favaro (1890-1907). El pasaje completo está reproducido y comentado en el capítulo 19 de Frova y Marenzana (1998). Las partes citadas en el texto las traduzco de la edición original.

eso solo prueba que la velocidad de la luz es mucho mayor que la velocidad del sonido, pero la experiencia es compatible con el hecho de que ambas velocidades sean finitas. Con todo, Galileo tampoco pudo evitar la invocación de una observación corriente y bien conocida por todos en apoyo de la hipótesis de la propagación sucesiva de la luz: la aparente demora de la luz de un relámpago entre las nubes. Las palabras de Salviati son las siguientes:

Por el momento, yo compararía [la velocidad de la luz] con el movimiento que vemos realizarse del resplandor del relámpago visto entre las nubes lejanas, a ocho o diez millas; de cuya luz distinguimos el principio, y diría la cabeza y la fuente, en un lugar particular entre esas nubes, pero bien inmediatamente sigue su amplísima expansión por los lugares circundantes, lo cual me parece un argumento de que ella se realiza con al menos algún tiempo; porque si la iluminación se hiciera toda junta, y no por partes, no se podría distinguir su origen, y diría su centro, de sus contornos y dilataciones extremas.

La analogía, sin embargo, no es acertada. La impresión de que la luz del relámpago tarda un tiempo en propagarse entre las nubes (o un rayo en caer al suelo) es el producto de una ilusión óptica. Se la conoce como “movimiento- γ ” y fue descubierta por Friedrich Kenkel en 1913. Se debe al hecho de que se produce una apariencia de movimiento cuando los cuerpos que están en la oscuridad se iluminan de manera repentina. La explicación de esta ilusión óptica no nos concierne aquí; el punto importante es que, como sabemos de manera retrospectiva, la apariencia no puede deberse a la propagación de la luz del relámpago, cuyo tiempo es de fracciones de segundo que están muy por debajo del umbral de la percepción humana (una cincuenta millonésima parte de un segundo para una distancia de 15 kilómetros). Por cierto, para ser justos con Galileo, él no tenía en ese momento manera alguna de saberlo. Por otra parte, no invocó esta experiencia como un argumento probatorio, que fuera a reemplazar al experimento que había concebido, sino como una mera analogía ilustrativa.

En el pasaje de los *Discorsi* citado, Galileo (esto es, Salviati) afirmó haber realizado un experimento que siempre se ha considerado como el primer intento de medir la velocidad de la luz. En realidad, la pretensión de Galileo no era esa, sino solo la de determinar, mediante lo que hoy llamamos una experiencia controlada, si la luz tarda algún tiempo en propagarse a través de una distancia relativamente larga. Lo describió en los siguientes términos. Dos hombres provistos de una lámpara cada uno

se colocan a una corta distancia e intercambian señales tapando y destapando las lámparas de manera sincronizada. Luego, se alejan a una distancia de dos o tres millas y:

[...] volviendo de noche a hacer la misma experiencia van observando atentamente si sus respectivos encendidos y apagados siguen el mismo tenor que cuando estaban cercanos. Si lo siguen, se podrá concluir con bastante seguridad que la expansión de la luz es instantánea, ya que si esta necesitara tiempo en una lejanía de tres millas, que suman seis por la ida de una luz y la vuelta de la otra, la demora debería ser bien observable. Y cuando se quisiera hacer estas observaciones a una distancia mayor, de ocho o diez millas, podríamos servirnos del telescopio...

No sabemos cuándo tuvo lugar el experimento, ni tampoco si realmente fue realizado por el propio Galileo. Algunos historiadores de la ciencia, siguiendo las ideas de Koyré (1939/1966), pensaron que todos los experimentos que Galileo relató en sus obras fueron experimentos mentales y no experimentos reales. Actualmente esa tesis no tiene el apoyo de los especialistas, ya que hay evidencia de que al menos algunos experimentos fueron reales, aunque no podemos datarlos con precisión ni estar seguros de si fueron realizados tal como Galileo los describió. La evidencia no es abundante, pero se han encontrado manuscritos inéditos de Galileo que contienen diagramas y listas de números que, de manera verosímil, representan el resultado de mediciones.⁹ En el caso de este experimento sobre la propagación de la luz, no parece probable que el resultado negativo que Galileo informa pudiera haberse obtenido por medio de un puro razonamiento, por lo que es razonable suponer que fue un experimento real. Por otra parte, las actas de la *Accademia del Cimento* de 1667 informan que el experimento se llevó a cabo sobre la distancia de una milla con resultado negativo (Magalotti 1667, p. 265).¹⁰ Sea como fuere, para los fines del análisis epistemológico que me propongo realizar, no es relevante saber si se trata de un experimento real o mental. En cualquier caso, es un experimento que podría haber sido real (a diferencia

⁹ Esta cuestión ha sido muy discutida y no me propongo examinarla aquí. Drake (1978) representa el punto de vista empirista, opuesto a la interpretación racionalista de Koyré.

¹⁰ Dado que la *Accademia* se fundó en 1657, el experimento en cuestión debió haberse llevado a cabo en algún momento posterior a esta fecha, pero anterior a 1667, es decir entre 15 y 25 años después de la muerte de Galileo.

de muchos experimentos mentales que postulan condiciones iniciales o instrumentos de medición ideales o que no son producibles en la práctica) y, además, podría haber sido realizado exactamente como Galileo lo describió.

Galileo explicó en estos términos el resultado negativo de su experimento:

En verdad no lo he experimentado excepto en distancias pequeñas, es decir, de menos de una milla, por lo cual no he podido asegurarme de si la aparición de la luz opuesta es instantánea; pero si no es instantánea, al menos es velocísima, e incluso diría momentánea.

Hay varias dificultades prácticas para la realización del experimento. Ante todo, existe un retardo inevitable en el movimiento de cubrir y descubrir las lámparas con las manos, ya que no es un proceso instantáneo. Galileo, consciente de ello, propone comparar las demoras cuando las lámparas están cercanas y cuando están alejadas. Si el tiempo transcurrido entre una señal y otra aumentara cuando recorren mayores distancias, la demora adicional debería atribuirse a la velocidad finita de la luz. En principio, conocida la distancia, se podría calcular la propia velocidad de la luz. Todavía hay otra dificultad y es que el tiempo empleado en el movimiento para cubrir y descubrir cada lámpara no es constante, sino sujeto a variaciones producidas, por ejemplo, por la fatiga al repetir el movimiento. Para superar esta dificultad, que Galileo no menciona, sería necesario repetir muchas veces el intercambio de señales, tanto a corta como a larga distancia, y luego promediar los tiempos registrados en cada caso. Comparando los dos promedios obtenidos, podría determinarse si hay alguna diferencia significativa, es decir, algún incremento en el tiempo cuando aumenta la distancia entre las lámparas.

Retrospectivamente, ahora que conocemos cuán alta es la velocidad de la luz, sabemos que Galileo no podría haber obtenido un resultado positivo, es decir, haber observado alguna demora adicional entre las señales luminosas, no solo sobre distancias como las que menciona, sino incluso sobre distancias mucho más grandes. Para que hubiera una demora perceptible, digamos de una décima de segundo, se habría necesitado alejar las dos lámparas a una distancia de casi 15.000 kilómetros, algo que es imposible sobre la superficie de la Tierra, aunque se usaran telescopios, como los que el propio Galileo había inventado. Por otra parte, sin el empleo de algún reloj de precisión que permitiera medir intervalos temporales muy pequeños (al menos del orden de las milésimas

de segundo) la distancia no puede disminuirse de manera significativa, ya que la percepción humana tiene un umbral y no es capaz de detectar procesos físicos que ocurran en intervalos menores que una vigésima parte de segundo. Resulta evidente que Galileo, aunque estaba convencido de que la velocidad de la luz era finita, no tenía idea alguna acerca del orden de magnitud de esta velocidad.¹¹

Todo lo anterior muestra que el experimento concebido por Galileo no tenía en la práctica ninguna probabilidad significativa de obtener un resultado positivo. Resulta curioso que a Galileo no se le ocurriera reemplazar a uno de los observadores por un espejo. De este modo, se evitaría la demora producida al enviar la señal luminosa de vuelta, así como los posibles errores de percepción de quien recibe la primera señal. El experimento ganaría notablemente en precisión mediante el uso de espejos, pero, de todos modos, no podría dar un resultado positivo si se lo realizara sobre las distancias en las que pensaba Galileo, u otras mucho mayores. Para que se pudiera detectar una demora en la propagación de la luz, era necesario encontrar algún mecanismo de precisión para medir tiempos muy cortos. De hecho ese fue el gran aporte de Armand Fizeau cuando concibió el conocido método de la rueda dentada, que le permitió medir intervalos del orden de las diezmilésimas de segundo. El uso combinado de un espejo, un telescopio y un mecanismo de precisión para medir tiempos muy pequeños hizo posible que Fizeau realizara la primera medición terrestre de la velocidad de la luz; pero ello ocurrió recién en el año 1849, cuando la hipótesis de la propagación sucesiva de la luz ya había sido aceptada hacía mucho tiempo.¹²

¹¹ La primera estimación correcta de este orden de magnitud fue la de Römer (1676, p. 235) y la primera formulación publicada de un valor determinado para la velocidad de la luz fue la de Huygens (1690/1920, p. 9), cuya redacción es apenas dos años posterior al trabajo de Römer.

¹² La evidencia anterior al experimento de Fizeau (1849) procedía de las observaciones astronómicas de Römer (1676) sobre la demora en los eclipses del primer satélite de Júpiter, y del descubrimiento de la aberración de la luz estelar por parte de Bradley (1729). En sentido estricto, ni Römer ni Bradley midieron la velocidad de la luz, ya que solo calcularon el tiempo que tardaba la luz en recorrer el radio de la órbita terrestre. Me he ocupado de este tema en Cassini (2014b). Boyer (1941) ofrece muchos datos sobre otras fuentes y autores de esta época. El hecho de que tanto Huygens (1690/1920, p. 8) como Newton (1687, I, XIV, Prop. XCVI, p. 231; 1704, II, III, Prop. XI, p. 77) apoyaran la opinión de Römer sin duda contribuyó a volver aceptable la hipótesis de la velocidad finita de la luz. Con todo, esta hipótesis no tuvo consenso entre los físicos hasta después del descubrimiento de Bradley.

4. Análisis epistemológico del experimento de Galileo

Un *experimento crucial* es un tipo particular de experiencia controlada que se propone contrastar simultáneamente dos (o más) *hipótesis o teorías rivales*. Se llaman rivales a las hipótesis incompatibles, es decir, que no pueden ser simultáneamente verdaderas, aunque en algunos casos puedan ser ambas falsas. Las hipótesis de la propagación instantánea y la de la propagación sucesiva de la luz son, evidentemente, hipótesis rivales. La primera implica que la velocidad de la luz es infinita, mientras que la segunda implica que la velocidad es finita. Es obvio que no pueden ser ambas verdaderas. Además, dado que son contradictorias entre sí, no pueden ser ambas falsas, por lo cual si una de ellas es verdadera, la otra necesariamente debe ser falsa. Generalmente, en la historia de la ciencia las hipótesis rivales son meramente contrarias, por lo que pueden ser ambas falsas, como ocurre, por ejemplo, con las teorías planetarias de Tolomeo y Copérnico.

En un experimento crucial el objetivo es encontrar un resultado tal que solo una de las dos hipótesis rivales resulte refutada (si hay más de dos hipótesis rivales, todas, excepto una, deben ser refutadas). En el caso especial de que las dos hipótesis en cuestión sean contradictorias, si una de ellas resulta refutada, la otra quedará verificada, es decir, se habrá probado que una de ellas es verdadera y la otra es falsa.¹³ En cambio, si las rivales son meramente contrarias y el experimento refutara una de ellas, la otra no quedaría verificada, sino meramente confirmada, es decir, recibiría algún grado de apoyo inductivo de la evidencia obtenida.

El experimento crucial consiste en poner a prueba dos predicciones diferentes, que se llaman *predicciones rivales*, implicadas por cada una de las teorías o hipótesis rivales. Estas predicciones, usualmente, afirman que dadas ciertas condiciones iniciales (como las de un experimento), se producirá un determinado evento observable, o bien no se producirá tal evento, o bien ocurrirá otro evento incompatible con este. Las predicciones rivales, tienen, entonces la forma condicional: $(C_1, \dots, C_k) \rightarrow E_1$ y $(C_1, \dots, C_k) \rightarrow E_2$, donde C_1, \dots, C_k es un conjunto finito de enunciados de condiciones iniciales y E_1 y E_2 son dos enunciados que describen eventos observables e incompatibles entre sí, es decir, que no pueden ocurrir simultáneamente. Por ejemplo, en el experimento de Galileo, la hipótesis de la propagación sucesiva de la luz permite deducir la predicción

¹³ Este es el tipo de experimento que Klimovsky (1994, p.192) llama “experimento crucial de segunda especie”, al que considera más bien atípico en las ciencias.

de que en el intercambio de señales con las lámparas (que son las condiciones iniciales del experimento) se producirá una demora, proporcional a la distancia recorrida, entre la emisión y la recepción de la luz (que es un evento observable). La hipótesis de la propagación instantánea, por su parte, predice que en esas mismas condiciones no se producirá ninguna demora adicional entre la emisión y la recepción cuando se incrementa la distancia entre las lámparas. La realización del experimento crucial consiste en producir las condiciones iniciales y comprobar qué ocurre, es decir, cuál es el evento que se observa (o no se observa, según el caso).

Un experimento crucial resulta exitoso cuando el resultado obtenido permite confirmar una de las hipótesis o teorías rivales y refutar la otra. Si ambas hipótesis resultan confirmadas o refutadas, el experimento crucial fracasa, ya que no permite discriminar entre ellas. En el experimento de Galileo, dado que las hipótesis rivales son contradictorias, la refutación de una de ellas implica la verificación de la otra. Esta situación se habría producido únicamente si se hubiera observado alguna demora diferencial en el intercambio de señales luminosas. En tal caso, la hipótesis de la propagación sucesiva habría sido verificada y la hipótesis de la propagación instantánea habría sido refutada. El resultado negativo que obtuvo Galileo, en cambio, no permite refutar ninguna de las dos hipótesis rivales, ya que resulta compatible con ambas. En efecto, a pesar de lo que parece haber pensado Galileo, el hecho de que no se observe una demora en las señales no implica que la velocidad de la luz sea infinita, sino solamente que es más alta que un determinado umbral calculable. En el experimento de Galileo, si la distancia fue de una milla (aproximadamente 1600 metros) y admitimos que el umbral de la percepción humana es de $1/20$ segundos, el resultado negativo del experimento solo prueba que la velocidad de la luz es tal que recorre dos millas (el camino de ida y vuelta) en menos de la vigésima parte de un segundo. Esta sería una velocidad de al menos 64 kilómetros por segundo, muy alta a escala humana, pero muy baja comparada con la velocidad de la luz tal como la conocemos. Si se duplicara la distancia entre las lámparas, también se duplicaría la velocidad mínima de la luz que resulta compatible con el resultado negativo del experimento, y así sucesivamente. De esta manera, ningún resultado negativo en el experimento de Galileo podría verificar la hipótesis de que la velocidad de la luz es infinita, ni tampoco refutar la hipótesis de que la velocidad de la luz es finita. Esto vale para cualquier experimento del mismo tipo que el de Galileo, como se verá a continuación.

5. Otros experimentos posibles

Llamaré *experimento del mismo tipo que el de Galileo* a todo experimento que se proponga medir el tiempo empleado por una señal luminosa en recorrer una distancia determinada en un viaje de ida y vuelta. Consideremos ahora otro experimento posible, que no es más que un refinamiento del de Galileo. Se coloca un espejo a una determinada distancia relativamente grande, por ejemplo, en la cima de una montaña lejana. Desde la cima de otra montaña un científico envía un rayo láser (o una señal de radar) y lo hace rebotar en el espejo, al que observa con un telescopio, como había sugerido el propio Galileo. El rayo se refleja y vuelve al punto de emisión donde hay un detector dotado de un reloj muy preciso que puede medir intervalos de tiempo muy pequeños. Supongamos que la distancia entre las montañas sea de 100 kilómetros y el reloj sea capaz de medir un retardo de una milésima de segundo entre la emisión y la recepción de la luz. Si el resultado del experimento es negativo, esto es, si el reloj no mide ninguna demora, lo único que puede concluirse es que la velocidad de la luz es mayor que la que se requeriría para hacer el camino de ida y vuelta al espejo en un tiempo menor que una milésima de segundo (esto es, la luz recorre 200 kilómetros en 1/1000 segundos, por tanto, tiene una velocidad mínima de 200.000 de kilómetros por segundo). De hecho, si se hiciera el experimento, habría una demora de 1/1500 segundos, por lo que el reloj no podría detectarla.

Hay dos maneras de mejorar el experimento: aumentar la distancia al espejo o incrementar la precisión del reloj en el detector, o bien ambas a la vez. Supongamos que el espejo se coloca sobre la superficie de la Luna (que está a una distancia media de 384.400 kilómetros de la Tierra) y se construye un nuevo reloj capaz de medir intervalos de tiempo de una diezmilésima de segundo. Todo esto es técnicamente posible en nuestros días. Si el experimento volviera a dar un resultado negativo, tampoco podría concluirse que la velocidad de la luz es infinita, sino solo que es mayor que 7.688.000.000 kilómetros por segundo, una velocidad muy alta, por cierto, pero finita.

Podríamos aumentar indefinidamente la distancia al espejo y mejorar indefinidamente la precisión del reloj, pero aun así nunca podríamos refutar la hipótesis de que la velocidad de la luz es finita. En cualquier experimento concebible, aunque no sea posible realizarlo en la práctica, la distancia al espejo será finita y la precisión del reloj también será finita. Por consiguiente, un resultado negativo no será capaz de decidir entre las dos hipótesis rivales que estamos considerando, ya que siempre será compatible con una velocidad finita para la luz. Habría dos

maneras concebibles de verificar la hipótesis de que la velocidad de la luz es infinita: una sería realizar el experimento sobre una distancia infinita, y la otra sería emplear un reloj de precisión infinita, esto es, que pudiera medir intervalos de tiempo infinitamente pequeños. Ambas cosas son imposibles por principio, por lo que tal experimento no es realizable.

Consideremos ahora una versión diferente y más refinada del experimento, donde la distancia no se recorre en un viaje de ida y vuelta de la señal luminosa, sino que esta recorre un número ilimitado de veces un circuito cerrado.¹⁴ De esta manera, la distancia recorrida se puede incrementar sin límite. No sería viable hacerlo mediante un juego de espejos dispuestos en forma de polígono, ya que los espejos terminarían por absorber toda la luz emitida en un tiempo extremadamente corto. El experimento podría hacerse, sin embargo, enviando un pulso de luz muy breve, como el flash de una cámara fotográfica, a través de una fibra óptica que, para pensar en grande, podemos imaginar que rodeara toda la Tierra (por lo que tendría una circunferencia de 40.076 kilómetros, en el Ecuador). El pulso de luz daría vueltas indefinidamente alrededor de la Tierra, mientras que en el laboratorio podría medirse fácilmente si hay una demora en recibirlo luego de una, dos o cualquier número de vueltas. Aun así, este dispositivo tampoco permitiría confirmar que la velocidad de la luz es infinita. Para ello sería necesario observar el paso de la luz durante un tiempo infinito sin detectar ningún retardo, cosa que es obviamente imposible.

Los experimentos del tipo de Galileo, en caso de que tuvieran un resultado positivo, como ya señalé, constituirían una medición indirecta de la velocidad de la luz. No obstante, la velocidad medida sería la *velocidad media* en un *viaje de ida y vuelta* respecto del observador. La *velocidad instantánea* de la luz, esto es, en un punto del espacio (o del espacio-tiempo) resulta teóricamente calculable, pero en la práctica, como cualquier velocidad instantánea, es imposible de medir. Por otra parte, la velocidad media en un viaje de ida, sin retorno, presupone el empleo de dos relojes sincronizados que se encuentran separados entre sí. Pero, dado que la sincronización de relojes a distancia debe realizarse mediante el intercambio de señales que viajan a la propia velocidad de la luz, es objeto de discusión si tal experimento resulta posible, incluso en principio.¹⁵

¹⁴ Este experimento lo propuso Marcelo Leonardo Levinas cuando discutíamos el experimento de Galileo. Dada la manera como he definido los experimentos del tipo de Galileo, este experimento debe considerarse de un tipo diferente.

¹⁵ Esta cuestión, en particular, la posible sincronización mediante el transporte lento de relojes, se ha discutido intensamente en el marco de la teoría de la relatividad especial, pero no es relevante ocuparse aquí de ella.

Si admitimos que un experimento del tipo de Galileo es posible en la práctica, la obtención de un resultado positivo permitiría resolver la secular disputa sobre la propagación de la luz, a la vez que establecería un valor aproximado, aunque solo fuera en orden de magnitud, para la velocidad de la luz. Sin embargo, la presencia inevitable de hipótesis auxiliares hace que las cosas no sean tan sencillas.

6. Hipótesis auxiliares

Un experimento de medición del tipo de Galileo, como cualquier otro experimento, se realiza sobre la base de un cuerpo de conocimiento previamente aceptado que no se considera problemático, al menos de manera provisoria, ni se pone en juego en la realización de ese experimento. Las hipótesis auxiliares y las teorías presupuestas se encuentran presentes en la concepción y realización de todo experimento científico. A menudo el propio experimentador no es consciente de ellas, y su número puede llegar a ser tan grande que resultaría difícil formularlas a todas de manera explícita y precisa. No intentaré, entonces, ser exhaustivo, sino solo discutir aquellas que me parecen más importantes en este caso.

Observemos, en primer lugar, que en todos los experimentos en los que se emplee algún espejo hay una hipótesis auxiliar implícita, que, hasta donde conozco, nunca ha sido cuestionada. Se trata de la hipótesis de que el proceso de reflexión es instantáneo y que, por consiguiente, la demora que pueda observarse en el viaje de ida y vuelta de un rayo de luz reflejado no se debe al proceso mismo de reflexión, sino al tiempo de propagación de la luz. Si se niega este supuesto, puede salvarse de la refutación a la hipótesis de la propagación instantánea de la luz, simplemente atribuyendo el tiempo de demora observado, que sobre distancias cortas será siempre muy breve, a la reflexión misma.

El supuesto de que la reflexión es un proceso instantáneo, desde el punto de vista de la física actual, es obviamente falso, por lo cual merece aquí un análisis más detallado. Sabemos que la velocidad de la luz en medios materiales transparentes, como el agua, es menor que en el vacío. Dicha velocidad es inversamente proporcional al índice de refracción del medio, por lo que la disminución de la velocidad es casi despreciable en el aire, cuyo índice de refracción es muy bajo, pero significativa en medios densos como el vidrio de un espejo, cuyo índice de refracción es bastante alto. De hecho, la velocidad de la luz en el agua es aproximadamente igual a $3/4c$, mientras que en el vidrio disminuye hasta $2/3c$.¹⁶ Por consiguiente,

¹⁶ El índice de refracción del vacío se define, convencionalmente, como igual a 1. El

en el proceso de la reflexión debe producirse una demora debida a la refracción del rayo luminoso que atraviesa el cristal del espejo, se refleja en la placa metálica posterior y vuelve a atravesar el cristal. Si suponemos que el vidrio del espejo mide medio centímetro de espesor, la luz que se refleja debe recorrer un centímetro a la velocidad $2/3c$. Este hecho provocará una demora extremadamente pequeña en comparación con un rayo de luz que recorriera la misma distancia a la velocidad de la luz en el aire.¹⁷ En la práctica esta demora se considera despreciable para todo fin realizable, ya que no sería medible por medio de ningún instrumento. De todos modos, en un experimento ideal, que fuera extremadamente preciso, debería tenerse en cuenta y descontarse a la demora observada. Si la demora observada en el recorrido de la luz sobre una distancia relativamente grande comparada con el espesor del espejo, digamos del orden de los kilómetros, como en el experimento de Galileo, fuera del mismo orden de magnitud que la demora producida por la refracción dentro del espejo, lo más razonable sería atribuirla al proceso de reflexión y no a la propagación sucesiva de la luz. Por consiguiente, el experimento no confirmaría la hipótesis de la velocidad finita.

La situación es más compleja desde el punto de vista de la teoría cuántica de la luz, donde la reflexión debe concebirse como un proceso de absorción y emisión de los fotones que componen el rayo incidente por parte de los electrones que se encuentran en los átomos del espejo. La reflexión es, entonces, un proceso de interacción entre fotones y electrones y, como tal, debe tardar algún tiempo. De lo contrario, se violaría la teoría de la relatividad especial, que prohíbe explícitamente cualquier interacción física que ocurra con una velocidad mayor que la velocidad de la luz en el vacío. Ignoremos por el momento la refracción en el vidrio. En la reflexión, los fotones incidentes que llegan a la placa metálica del espejo son absorbidos por los electrones de los átomos del metal y luego otros fotones

índice de refracción del aire es igual a 1,00029, por lo que la velocidad de la luz disminuye aproximadamente 88.000 metros por segundo respecto de su velocidad en el vacío. Los índices de refracción del agua y del vidrio son aproximadamente iguales a 1,33 y 1,51, respectivamente, por lo que la velocidad de la luz disminuye en 74.500 y 101.400 kilómetros por segundo, en cada caso. Estos valores son solamente aproximados por varias razones. Ante todo, el índice de refracción varía un poco en relación con la pureza del agua, pero varía bastante según los distintos tipos de vidrios. Además, aquí se ignora el carácter dispersivo de los medios materiales, en los cuales el índice de refracción es diferente para los rayos de luz de diferente frecuencia, es decir, de diferente color. Para el caso del agua por ejemplo, el índice de refracción es de 1,331 para la luz roja y de 1,341 para la luz azul.

¹⁷ La demora sería del orden de una 17 mil millonésima parte de un segundo.

de la misma frecuencia (por consiguiente, indistinguibles de los incidentes)¹⁸ son emitidos en la dirección contraria, de modo que los ángulos de incidencia y reflexión sean iguales. Cuando los fotones son absorbidos se aniquilan completamente y transmiten toda su energía y todo su momento a los electrones, que resultan así excitados. Estos electrones excitados emiten, entonces, otros fotones dotados de la misma energía y el mismo momento que los fotones incidentes. Los fotones, nuevamente de acuerdo con la relatividad especial, no pueden desacelerarse, por lo que deben ser aniquilados y creados instantáneamente por los electrones. Sin embargo, entre el proceso de absorción de los fotones incidentes y el proceso de emisión de los fotones reflejados, debe transcurrir algún tiempo, por pequeño que sea.¹⁹ Una vez más, esta demora se considera despreciable para todo fin práctico, pero en un proceso de medición ideal sumamente preciso, debería resultar observable.

El proceso de reflexión de la luz en un espejo no es instantáneo, entonces, por dos razones diferentes. A la demora producida por la refracción de la luz dentro del cristal debe agregarse la demora producida por la interacción entre la luz y la placa metálica. Por consiguiente, no sería en principio absurdo atribuir la demora registrada en un experimento al proceso de reflexión y no a la propagación de la luz, en caso de que el tiempo medido fuera muy corto.

La hipótesis auxiliar de que la luz tarda tiempo en reflejarse, sin embargo, es susceptible de confirmación independiente mediante una secuencia de experimentos del tipo de los de Galileo. Para ello es necesario disponer de experimentos con resultados positivos realizados sobre diferentes distancias. Si, dada una distancia L , se mide un intervalo de tiempo T entre la emisión y la recepción de un pulso de luz que se refleja, y esta demora se debe a la velocidad finita de luz, entonces, si la distancia se incrementa a $2L$, el tiempo debería incrementarse a $2T$, y así proporcionalmente con diferentes distancias. El tiempo empleado en el

¹⁸ La energía ($E = h\nu$) y el momento ($p = h\nu/c$) de un fotón dependen exclusivamente de su frecuencia (donde h es la constante de Planck y ν la frecuencia de la luz). Por consiguiente, si dos fotones tienen la misma frecuencia, resultan indiscernibles (excepto por la dirección del momento). Las propiedades que identifican al fotón y permiten diferenciarlo de otras clases de partículas elementales (masa en reposo nula, *spin* 1 y carga eléctrica nula) son, por su parte, invariantes.

¹⁹ Esta demora, además, es la que permite explicar la disminución que la velocidad de la luz sufre en el vidrio, ya que la refracción de la luz también es, desde el punto de vista cuántico, un proceso de interacción entre fotones y electrones. Recuérdese que los fotones se mueven siempre en el vacío, y no en un medio material continuo, con la velocidad invariante c , por lo que ningún fotón puede desacelerarse cuando penetra en el vidrio.

proceso de reflexión debería ser el mismo en todos los casos, de modo que la observación de una demora proporcional a la distancia constituiría una evidencia de que la duración del proceso de reflexión es despreciable y de que el tiempo que tarda la señal en retornar se debe a la velocidad finita de la luz.

Sería posible salvar de la refutación a la hipótesis de la propagación instantánea de la luz empleando la hipótesis auxiliar de que el tiempo que tarda la luz en reflejarse es proporcional a la distancia de la fuente luminosa. De esta manera, podrían ajustarse los resultados positivos de todos los experimentos sobre diferentes distancias. Sin embargo, esta hipótesis sería puramente ad hoc. Por otra parte, se trata de una hipótesis que no encuentra justificación ni apoyo en ninguna teoría física vigente. Al contrario, todo nuestro conocimiento indica que los procesos de refracción de la luz dentro del vidrio del espejo y de interacción entre la luz y la placa metálica del espejo son completamente independientes de la distancia recorrida por la luz incidente, de modo que se desarrollarían de la misma manera cualquiera que fuera la ubicación de la fuente luminosa. Finalmente, la hipótesis tiene consecuencias inverosímiles cuando se toman en cuenta distancias muy largas. Así, por ejemplo, un pulso de luz enviado hacia una estrella que se encontrara a 100 años luz de distancia debería tardar 200 años en reflejarse antes de retornar instantáneamente a la Tierra. Con todo, como ocurre con muchas hipótesis ad hoc, la hipótesis de que el tiempo de reflexión es proporcional a la distancia de la fuente luminosa todavía no está experimentalmente refutada. No es, sin embargo, irrefutable por principio. Podría refutarse en caso de que pudiera medirse el tiempo de reflexión de la luz (que tiene que ser extremadamente breve) y corroborarse que ese tiempo permanece constante en diferentes experimentos del mismo tipo realizados sobre distancias diferentes. Si esta secuencia de experimentos fuera posible, y en ellos se observara una demora proporcional a la distancia recorrida por la señal luminosa, dicha demora debería atribuirse inequívocamente a la velocidad finita de la luz.

Todavía sería posible imaginar otras hipótesis ad hoc, aun más inverosímiles, que impidieran la refutación de la hipótesis de la propagación instantánea de la luz frente a cualquier resultado experimental positivo. Pero no habría razón para tomarlas en cuenta, a menos que fueran contrastables en principio, aunque no en la práctica. Como es bien sabido, desde un punto de vista puramente lógico, siempre es posible, mediante la introducción de hipótesis ad hoc, inmunizar a una teoría frente a cualquier experiencia desfavorable.

El experimento de Galileo, como todos los de su tipo, ciertamente

presupone una cláusula *ceteris paribus*, según la cual no hay influencias perturbadoras desconocidas que puedan afectar a la velocidad de la luz en el curso de su viaje de ida y vuelta al detector. Pero este tipo de hipótesis auxiliar, como se sabe, no es característica de los experimentos cruciales, sino que resulta necesaria en cualquier clase de experimento. Si se cuestiona la veracidad de la cláusula *ceteris paribus*, cualquier resultado experimental puede ponerse en duda. Con todo, mientras no haya razones para creer en la existencia de factores perturbadores no contemplados en el diseño de un experimento, es usual, y razonable, aceptar la cláusula *ceteris paribus*. Por cierto, es una decisión riesgosa, ya que esta cláusula, como cualquier otra hipótesis auxiliar, podría ser falsa.

La hipótesis de que la velocidad de la luz no está afectada de manera significativa por el medio material en el cual se propaga es otra hipótesis auxiliar que podría caer bajo la cláusula *ceteris paribus*. Esta hipótesis es de hecho falsa, como ya se señaló antes. En medios transparentes densos, como el agua o el vidrio, la velocidad de la luz desciende significativamente. Sin embargo, para medios de índice de refracción bajo, como el aire, la disminución de la velocidad es muy pequeña y generalmente despreciable, ya que no resulta medible, por lo que puede considerarse que la velocidad de la luz en dichos medios es igual a la de la luz en el vacío. Todas estas consideraciones son en realidad relevantes solo cuando se intenta medir la velocidad de la luz con alguna precisión. Para un experimento como el de Galileo, que solo intentaba confirmar la hipótesis de que la luz tarda un tiempo finito en propagarse por el espacio, no tienen en la práctica ningún efecto significativo. De hecho, un experimento del tipo de Galileo podría realizarse perfectamente en el agua, o en cualquier otro medio transparente. Allí las probabilidades de un resultado positivo serían incluso mayores, ya que la luz se propaga más lentamente que en el aire, aunque, en la práctica sería un experimento técnicamente mucho más difícil de realizar, especialmente sobre distancias grandes.

La crítica de Pierre Duhem a los experimentos cruciales es bien conocida y aquí no me detendré particularmente en ella.²⁰ Duhem (1906/1981) argumentó que ninguna hipótesis teórica tiene por sí misma consecuencias observacionales, por lo que para poder contrastarla mediante la experiencia es necesario apelar a un conjunto amplio de hipótesis auxiliares. De esta manera, solo un sistema completo de hipótesis puede ser refutado, pero nunca una hipótesis aislada. Este hecho es indudable cuando se trata de leyes teóricas de gran generalidad, como los

²⁰ Me ocupo con mayor detalle en Cassini (2014a).

principios de Newton o los de la termodinámica clásica. Sin embargo, Duhem no extiende el alcance de su holismo epistemológico a las hipótesis empíricas, esto es, según el lenguaje de la filosofía de la ciencia clásica, a aquellas que como términos descriptivos solo contienen términos observacionales. Duhem las llama “leyes experimentales” y considera que son precisamente estas leyes las que permiten contrastar las teorías. Esto presupone, evidentemente, que las leyes experimentales pueden verificarse, o al menos confirmarse, por sí mismas. De esta clase son precisamente las hipótesis rivales de la propagación sucesiva o instantánea de la luz. Estas hipótesis solo emplean los conceptos de luz y de velocidad, mientras que el experimento solo mide intervalos de tiempo. Es razonable admitir que estos tres términos (luz, velocidad y duración) son de carácter observacional,²¹ por lo cual no se trata en este caso de hipótesis sin consecuencias observacionales por sí mismas (como serían, por ejemplo, las teorías corpuscular y ondulatoria de la luz). Por consiguiente, la crítica de Duhem no resulta aplicable a este experimento. No es un experimento que contrasta teorías o leyes teóricas, sino meras regularidades empíricas.

Este punto puede ilustrarse con el propio caso histórico que Duhem (1906/1981, pp. 282-284 y 286-288) invocó a favor de su posición holista: los experimentos de Fizeau y Breguet (1850) y Foucault (1850) que compararon las velocidades de la luz en el agua y en el aire; considerados en su momento como cruciales entre las teorías corpuscular y ondulatoria de la luz. La teoría corpuscular de Newton predecía que la velocidad de la luz en el agua debía ser proporcional al índice de refracción, mientras que la teoría ondulatoria de Huygens predecía que debía ser inversamente proporcional a dicho índice. Como consecuencia de ello, según la teoría corpuscular, la velocidad de la luz en el agua debía ser mayor que la velocidad en el aire; mientras que para la teoría ondulatoria debía ser menor en el agua que en el aire.²² Los experimentos verificaron, más allá

²¹ Usualmente, los conceptos métricos se consideran teóricos, por lo que podría cuestionarse el carácter observacional de los términos “velocidad” y “duración”. Sin embargo, en la práctica incluso autores como Carnap los tratan como observacionales. Por ejemplo, Carnap (1966, p. 241 y ss.) analiza las reglas de correspondencia de la teoría cinética de los gases, en las cuales considera que los términos “temperatura”, “presión” y “masa” son observacionales, mientras que “energía cinética” y “molécula” son teóricos.

²² En la notación actual sería $v = cn$ y $v = c/n$, respectivamente. Tomando el índice de refracción del aire como igual a 1 y el del agua como igual a 1,33, la velocidad de la luz en el agua resulta igual a $4/3c$ para la teoría corpuscular y a $3/4c$ para la teoría ondulatoria. Las dos predicciones rivales se encuentran formuladas en Huygens (1690/1920, pp. 32 y 35-36) y Newton (1704, II, III, Prop. X, 70-71), pero fueron deducidas ya hacia mediados de la década de 1670.

de toda duda razonable, que la velocidad de la luz era menor en el agua que en el aire, y que, además, tal velocidad estaba (aproximadamente) en proporción inversa al índice de refracción. Duhem señaló, con toda razón, que este experimento no refutó la hipótesis aislada según la cual la luz se compone de partículas, sino la teoría corpuscular como un todo. Igualmente, no confirmó la hipótesis de que la luz es una onda, sino la teoría ondulatoria en su totalidad. No puede haber duda sobre este punto, y el propio Foucault lo expresó de esa manera cuando afirmó que la experiencia se pronunciaba entre “los dos sistemas”, el ondulatorio y el de la emisión (Foucault 1850, p. 557). La razón de ello es que las hipótesis corpuscular y ondulatoria no permiten por sí mismas deducir las predicciones cruciales acerca de la velocidad de la luz en el aire y en el agua que se contrastaron en el experimento. Sin embargo, la hipótesis según la cual la luz disminuye su velocidad en el agua en una proporción inversa al índice de refracción no es una hipótesis teórica, sino puramente empírica, y, como tal puede ser verificada o refutada por la experiencia. De hecho, fue la verificación experimental de esa hipótesis la que permitió confirmar la teoría ondulatoria de la luz. Ese resultado experimental no depende de la teoría ondulatoria y, de hecho, sigue siendo válido en nuestros días, cuando, después de 1930, esta teoría fue reemplazada por la teoría cuántica de la radiación.

7. Carga teórica

Suponiendo que se aceptaran la hipótesis auxiliar según la cual la duración del proceso de reflexión es despreciable, la cláusula *ceteris paribus*, y acaso otras hipótesis auxiliares, todavía podría objetarse que los experimentos que confirman la velocidad finita de la luz se encuentran cargados de teorías presupuestas, en particular, de hipótesis acerca de la propia naturaleza de la luz. En el caso de los experimentos del tipo de Galileo, sin embargo, no hay carga teórica de esta clase. El experimento del propio Galileo no presupone hipótesis alguna sobre la naturaleza de la luz y es compatible, por ejemplo, tanto con la teoría corpuscular de Newton como con la teoría ondulatoria de Huygens (que se formularon medio siglo después). El experimento debe realizarse con luz visible, lo cual solo requiere que los observadores que experimentan puedan identificar perceptivamente el pulso de luz o la señal luminosa que se emplea. El mismo experimento, si se lo realizara actualmente, también resultaría compatible con la teoría cuántica de la luz, ya que la interpretación de su resultado no requiere el concepto de fotón ni tampoco hipótesis alguna relativa al comportamiento de los fotones. En suma, un

experimento como el de Galileo es puramente fenomenológico y no está guiado por ninguna teoría acerca de la naturaleza de la luz.

El ejemplo típico de un experimento óptico guiado por una teoría de la luz es el de los experimentos de interferencia, como el de Fizeau de 1851 o el célebre de Michelson y Morley de 1887. En este tipo de experimentos, un rayo de luz se divide por medio de un espejo semirreflectante en dos rayos que recorren caminos diferentes y luego, empleando algún juego de espejos, se los hace converger en un punto. Cuando los dos rayos se recombinan se forma un típico patrón de franjas de interferencia, que se interpreta como causado por las ondas que componen los dos rayos cuando arriban fuera de fase. Generalmente lo que busca observarse en este tipo de experimento es algún corrimiento en las franjas de interferencia cuando el aparato se rota o se pone en movimiento. En el experimento de Fizeau de 1851, por ejemplo, los rayos luminosos recorrían un circuito cerrado de tubos de vidrio llenos de agua y se observaba un desplazamiento de las franjas de interferencia cuando el agua se aceleraba respecto del laboratorio. Fizeau empleó explícitamente conceptos de la teoría ondulatoria de la luz, como el de longitud de onda, para calcular el desplazamiento de las franjas de interferencia que predecían las hipótesis rivales de arrastre total y parcial del éter luminífero por parte del agua en movimiento. En este sentido, tanto el diseño como la realización de su experimento estuvieron claramente guiados por la teoría ondulatoria de la luz.

No ocurre lo mismo en el caso de los experimentos para medir la velocidad de la luz o para determinar si se propaga de manera instantánea o sucesiva. En el experimento de Galileo solo se apela a conceptos observacionales, como los de señal luminosa y duración percibida. Incluso en una versión actual de este tipo de experimento, una en la que se empleara luz láser, la señal luminosa seguiría siendo observable y también lo sería, en principio, la demora entre la emisión y la recepción del pulso de luz (por ejemplo, en el caso de la reflexión en la Luna). El experimento puede diseñarse, realizarse e interpretarse sin apelar a conceptos ni hipótesis específicas de la teoría cuántica de la luz. Es indudablemente cierto que en un experimento así, donde se emplean instrumentos sofisticados, tales como generadores de luz láser y relojes atómicos, hay presupuestas una gran variedad de hipótesis y teorías que permiten construir y utilizar tales instrumentos. Esta carga teórica instrumental contiene numerosas hipótesis acerca de la estructura atómica de la materia y de la luz, por ejemplo, sobre la naturaleza del láser, que es un fenómeno típicamente cuántico. Lo mismo puede decirse de cualquier experimento menos sofisticado, como los ya citados de Fizeau y

Michelson y Morley, que emplean instrumentos ópticos de observación microscópica. En general, cualquier experimento que haga uso de instrumentos de observación o medición tendrá algún tipo de carga teórica instrumental, la cual varía mucho en grado de un caso a otro. Sin embargo, este tipo de carga teórica usualmente no guía la realización del experimento ni interviene en la descripción de sus resultados. Más bien, forma parte de un conocimiento de trasfondo que se considera aceptado y no se pone en juego en esos experimentos en particular.²³ Este hecho puede advertirse más claramente cuando la carga teórica instrumental proviene de otra ciencia. Así, por ejemplo, un biólogo que lleva a cabo un experimento sobre neuronas humanas empleando un microscopio óptico presupone, ciertamente, las teorías físicas que hicieron posible construir y emplear ese tipo de microscopio. Pero su experimento no está guiado por esas teorías físicas, sino, en todo caso, por hipótesis biológicas específicas acerca de las neuronas que observa, o de su preparación previa.

En un experimento del tipo de Galileo no se emplean instrumentos de observación, por lo que no hay carga teórica instrumental. Las hipótesis presupuestas acerca del comportamiento de la luz son extremadamente simples y se limitan al conocimiento de sentido común acerca de la reflexión de los rayos luminosos. Ni siquiera está presupuesta la ley de la reflexión de la óptica geométrica, ya que el experimento podría realizarse igualmente aunque el ángulo de reflexión no fuera igual al ángulo de incidencia. No requiere, además, la noción de velocidad, en tanto no se propone medir la velocidad de la luz, sino solo determinar si su propagación requiere tiempo. El resultado del experimento se puede describir exclusivamente en términos de los conceptos de distancia y duración. La distancia se considera como parte de las condiciones iniciales del experimento, por lo que la única magnitud medida es la duración. El resultado experimental puede expresarse, entonces, de esta forma: el tiempo que tarda en ir y regresar un pulso de luz que se refleja a una distancia L_1 es igual a T_1 . La duración es objeto de medición directa, y, por supuesto, de allí resulta, en caso positivo, una medición indirecta de la velocidad de la luz. De manera más general, el resultado de cualquier experimento del tipo de Galileo, no importa cuán grande sea la carga teórica instrumental que tenga, es decir, cuán sofisticados sean los instrumentos de medición empleados, puede describirse sin emplear más que conceptos cinemáticos. En tal sentido, se trata de experimentos de muy baja carga teórica y que, sin duda, no están guiados por una teoría específica acerca de la naturaleza de la luz. Ello

²³ Sobre la carga teórica instrumental de las observaciones y experimentos véase Heidelberger (2003), con cuyo enfoque concuerdo.

explica, en buena medida, la estabilidad de los resultados de este tipo de experimentos de medición frente al cambio teórico.

8. Conclusión

Los resultados del análisis epistemológico del experimento de Galileo se pueden resumir en los siguientes términos. Ante todo, *es posible, tanto en principio como en la práctica*, un experimento crucial entre hipótesis rivales como las de la propagación instantánea y la de la propagación sucesiva de la luz. El diseño del experimento tiene una muy baja carga teórica porque no presupone ninguna teoría específica acerca de la naturaleza o de las propiedades de la luz. El resultado del experimento se puede formular e interpretar en términos observacionales, por lo que resulta estable frente a posibles cambios teóricos, en particular, respecto de las diferentes teorías sobre la composición de la luz.

Si el experimento tiene un resultado positivo, esto es, si se observa una demora entre la emisión y la recepción de la luz, la hipótesis de que la luz se propaga con velocidad infinita queda refutada y, por consiguiente, la hipótesis rival según la cual la luz se propaga con velocidad finita queda verificada. Si, en cambio, el experimento tiene un resultado negativo, ninguna de las dos hipótesis queda refutada y, por tanto, tampoco alguna de ellas resulta verificada. En ese caso, el experimento crucial fracasa, ya que su resultado es compatible con las dos hipótesis rivales, por lo que, en términos puramente cualitativos, debe decirse que las confirma a ambas.

Este análisis se puede generalizar a cualquier experimento del tipo de Galileo, tal como se definió antes. Así, la hipótesis de que la velocidad de la luz es infinita no es verificable por ninguna experiencia, mientras que la hipótesis de que su velocidad es finita no es refutable por ninguna experiencia de este tipo. La hipótesis de que la velocidad de la luz es infinita es refutable por la experiencia, pero, en principio, puede inmunizarse mediante hipótesis ad hoc frente a cualquier resultado positivo de un experimento del tipo concebido por Galileo. La hipótesis de que la velocidad de la luz es finita es verificable experimentalmente, dado un contexto fijado de conocimiento antecedente en el cual no se introduzcan hipótesis ad hoc después de conocido el resultado del experimento. Por su parte, la hipótesis más específica de que la velocidad de la luz (en el vacío o en un medio material) tiene un valor determinado V es perfectamente refutable mediante un experimento que tenga como resultado otro valor diferente V' , que caiga fuera del margen del error experimental.

En conclusión, ningún experimento podría verificar, ni siquiera en principio, la hipótesis de la propagación instantánea de la luz. Si la velocidad de la luz fuera infinita, nunca podríamos saberlo. La misma conclusión se puede extender a cualquier velocidad infinita. No hay manera de verificar la hipótesis de que una interacción de cualquier clase se propaga de manera instantánea. Cualquier resultado experimental que confirmara esa hipótesis podría acomodarse mediante la hipótesis de que dicha interacción se propaga con una velocidad finita. Para ello sería suficiente con ajustar el umbral de esta velocidad para que resulte indetectable en cada experimento determinado. Todavía es posible extender más allá esta conclusión: ningún experimento de medición podría verificar la hipótesis de que una cierta magnitud física tiene un valor infinito. Cualquier resultado de esta clase de experimento, sea positivo o negativo, sería compatible con la hipótesis de que dicha magnitud tiene un valor finito, por grande o pequeño que sea. Por supuesto, en principio siempre sería posible *confirmar globalmente* una teoría acerca de la luz, o acerca de cualquier interacción física, que incluyera la hipótesis de la propagación instantánea, pero esta hipótesis por sí misma, a diferencia de su contradictoria, no sería susceptible de verificación.

Bibliografía

- Aquino, T. de (1270), *De aeternitate mundi contra murmurantes*, en Spiazzi, R. M. (ed.) (1954), *Opuscula philosophica*, Turín, Marietti, pp. 105-108.
- Aristóteles, *De anima*, Jannone, A. (ed.) (1980), París, Les Belles Lettres.
- *De sensu et sensibilibus*, Mugnier, R. (ed.) (1965), París, Les Belles Lettres.
- Bacon, F. (1620/1994), *Novum organum*, Urbach, P. y Gibson, J. (eds.), Chicago, Open Court.
- Boyer, C. (1941), “Early Estimates of the Velocity of Light”, *Isis*, 33 (1), pp. 24-40.
- Bradley, J. (1727), “An Account of a New Discovered Motion of the Fixed Stars”, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 35, pp. 637–661.
- Carnap, R. (1966), *Philosophical Foundations of Physics*, Nueva York, Basic Books. [Reeditado con el título de *An Introduction to the Philosophy of Science*, Nueva York, Dover, 1995.]
- Cassini, A. (2014a), “Una reivindicación de los experimentos cruciales”, *Revista de Filosofía* [en prensa].
- (2014b), “De Römer a Fizeau. Experimentos cruciales sobre la

- velocidad de la luz”, en Melogno, P. (ed.) *Ciencia, matemática y experiencia. Estudios de historia del conocimiento científico*, Montevideo, Universidad de la República [en prensa].
- Descartes, R. (1637), *La dioptrique*, en Adam, C. y Tannery, P. (eds.) (1902), *Oeuvres de Descartes*, París, Léopold Cerf, vol. VI, pp. 81-147.
- Drake, S. (1978), *Galileo at Work: His Scientific Biography*, Chicago, University of Chicago Press.
- Duhem, P. (1906/1981), *La théorie physique: son objet, sa structure*, París, Vrin.
- Favaro, A. (ed.) (1890-1907), *Edizione nazionale delle opere di Galileo Galilei*, vol. I-XX, Florencia, Barberá.
- Fizeau, A. (1849), “Sur une expérience relative à la vitesse de propagation de la lumière”, *Compte Rendu des Séances de l'Académie des Sciences*, 29, pp. 90-92.
- (1851) “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”, *Compte Rendue des Séances de l'Académie des Sciences*, 33, pp. 349-355.
- Fizeau, A. y Breguet, L. (1850), “Sur l'expérience relative à la vitesse comparative de la lumière dans l'air et dans l'eau”, *Compte Rendue des Séances de l'Académie des Sciences*, 30, pp. 771-774.
- Foucault, L. (1850), “Méthode générale pour mesurer la vitesse de la lumière dans l'air et les milieux transparents. Vitesses relatives de la lumière dans l'air et dans l'eau. Project d'expérience sur la vitesse de propagation du calorique rayonnant”, *Compte Rendue des Séances de l'Académie des Sciences*, 30, pp. 551-560.
- Frova, A. y Marenzana, M. (1998), *Parola di Galileo: Attualità del grande scienziato in una scelta commentata dei suoi scritti*, Milán, Rizzoli. [Traducción inglesa: *Thus Spoke Galileo: The Great Scientist's Ideas and their Relevance to the Present Day*, Nueva York, Oxford University Press, 2006.]
- Galilei, G. (1638), *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno à due nuove scienze*, Leiden, Elsevier.
- Giere, R. (1999), *Science without Laws*, Chicago, University of Chicago Press.
- Heidelbeger, M. (2003), “Theory-Ladenness and Scientific Instruments in Experimentation”, en Radder, H. (ed.), *The Philosophy of Scientific Experimentation*, Pittsburgh, University of Pittsburgh Press, pp. 138-151.

- Huygens, C. (1690/1920), *Traité de la lumière*, París, Gauthier-Villars.
- Kenkel, F. (1913) “Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Erscheinungsgrösse und Erscheinungsbewegung bei einigen sogenannten optischen Täuschungen”, *Zeitschrift für Psychologie*, 67, pp. 358-449.
- Klimovsky, G. (1994), *Las desventuras del conocimiento científico. Una introducción a la epistemología*, Buenos Aires, A-Z Editora.
- Koyré, A. (1939/1966), *Études Galiléennes*, París, Hermann.
- Lohne, J. A. (1968), “Experimentum Crucis”, *Notes and Records of the Royal Society of London*, 23 (2), pp. 169-199.
- Magalotti, L. (1667), *Saggi di naturali esperienze fatte nell' Accademia del Cimento*, Florencia, Giuseppe Cocchini.
- Michelson, A. y Morley, M. (1887), “On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Aether”, *American Journal of Science*, 34 (203), pp. 333-345.
- Newton, I. (1687), *Philosophiæ naturalis principia mathematica*, Londres, Joseph Streater.
- (1704), *Opticks*, Londres, Smith and Walford.
- Römer, O. (1676), “Démonstration touchant le mouvement de la lumière trouvé par M. Römer de l'Academie Royale des Sciences”, *Journal des Savants*, 7 de diciembre de 1676, pp. 233-236.
- Ronchi, V. (1938/1983), *Storia della luce, da Euclide a Einstein*, Bari, Laterza.
- Sabra, A. I. (1967/1981), *Theories of Light from Descartes to Newton*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Taton, R. (ed.) (1978), *Roemer et la vitesse de la lumière*, París, Vrin.

Recibido el 28 de agosto de 2014; aceptado el 16 de octubre de 2014.