

Una reivindicación de los experimentos cruciales

(Crucial Experiments Vindicated)

Alejandro CASSINI

Recibido: 10 de junio de 2013

Aceptado: 24 de marzo de 2014

Resumen

En este artículo reviso la crítica de Pierre Duhem a los experimentos cruciales y reivindico la existencia de esta clase de experimentos. Luego, estudio los experimentos de Fizeau y Foucault de 1850 y critico la interpretación que Duhem hizo de estos resultados experimentales. Argumento que el resultado de un experimento crucial siempre puede describirse en términos neutrales respecto de las teorías rivales en disputa. Por esta razón, dichos resultados experimentales son relativamente estables y pueden ser reinterpretados en nuevos contextos teóricos. Finalmente, distingo los experimentos cruciales exitosos, aquellos que confirman una teoría dada y disconfirman a sus rivales, de los experimentos decisivos. Los primeros permiten confirmar una teoría y disconfirmar a sus rivales, pero no necesariamente proporcionan razones suficientes para aceptar o rechazar una de tales teorías.

Palabras clave: Duhem, holismo epistemológico, confirmación deductiva, evidencia crucial, teoría ondulatoria de la luz.

Abstract

In this paper I assess Pierre Duhem's criticism of crucial experiments, and argue that we have reasons to vindicate their existence. I then analyze the experiments carried out by Fizeau and Foucault in 1850, and criticize Duhem's interpretation of their results. I contend that the results of crucial experiences can be described in terms that are neutral with respect to the competing theories. For that reason an experimental result is relatively stable and open to different interpretations in the light of new theories. I conclude by distinguishing successful crucial experiments from decisive experiments. The former are meant to provide evidence that confirms

one theory and disconfirms its rivals, but not necessarily to provide sufficient reasons for accepting or rejecting one of those theories.

Keywords: Duhem, epistemological holism, deductive confirmation, crucial evidence, wave theory of light.

Introducción

En este trabajo quiero reivindicar la existencia de experimentos cruciales en la ciencia y contribuir a determinar sus alcances y límites epistemológicos. Generalmente se ha admitido que un experimento crucial debe ser capaz de refutar una entre dos hipótesis o teorías rivales. También se ha considerado que la llamada tesis de Duhem-Quine implica que no es posible refutar hipótesis o teorías aisladas y, por tanto, tiene como consecuencia que los experimentos cruciales no son posibles. Aquí me propongo revisar de manera crítica estos dos supuestos y elaborar una concepción de los experimentos cruciales que haga justicia al papel que éstos han desempeñado en la historia de la ciencia moderna y en la práctica de la ciencia contemporánea. Argumentaré que los experimentos cruciales son posibles en la ciencia, aunque no refuten una teoría o hipótesis determinada, sino un sistema complejo y heterogéneo de hipótesis. Mostraré, además, examinando con detalle un caso histórico (la medición de la velocidad de la luz en el agua) que los propios físicos que realizaron este experimento (Fizeau y Foucault) comprendieron los límites de los experimentos cruciales, luego señalados por Duhem, y que, no obstante, no dejaron de considerar cruciales a los resultados que obtuvieron. Finalmente, distinguiré entre experimentos cruciales y experimentos decisivos, y señalaré que los experimentos cruciales no necesariamente deben ser decisivos.

1. La noción de experimento crucial

La idea de experimento crucial la concibió por primera vez Francis Bacon en el *Novum organon*, de 1620, bajo el nombre *instantia crucis* (Bacon, 1620, II, p. 36). La expresión *experimentum crucis* la empleó por primera vez Robert Hooke en su *Micrographia*, de 1665. En su primera publicación científica, “New Theory of Light and Colours”, de 1672, Newton llamó crucial a su famoso experimento del doble prisma, dirigido a probar que “la luz consta de rayos diferentemente refrangibles”, y citó a Hooke, del cual probablemente tomó la expresión. Con todo, no es evidente que se trate de un auténtico experimento crucial, ya que Newton no hace explícitas las hipótesis rivales que el experimento debería contrastar.¹

¹ Para mayores detalles véase Lohne (1968), que contiene muchos datos históricos. El experimento de Newton ha sido muy discutido, pero no pretendo ofrecer aquí mi propia interpretación.

Un experimento crucial es un experimento que permite la *contrastación simultánea* de dos o más hipótesis o teorías rivales². Las *hipótesis rivales* son aquellas que se proponen dar cuenta de un mismo dominio de fenómenos pero son incompatibles entre sí, esto es, no pueden ser simultáneamente verdaderas. Dos hipótesis rivales pueden ser contradictorias entre sí, y en tal caso, no es posible que sean ambas falsas. Si una de ellas es verdadera, la otra, necesariamente ha de ser falsa. Además, son exhaustivas del dominio de las posibilidades, por lo cual no es concebible una tercera hipótesis alternativa a ellas. Las hipótesis rivales contrarias, en cambio, pueden ser todas ellas falsas. Además, no son exhaustivas del conjunto de posibilidades, ya que, en principio, son concebibles muchas otras hipótesis alternativas. No es tan frecuente encontrar en la ciencia hipótesis rivales contradictorias, pero (en una determinada formulación, al menos) las hipótesis de la generación espontánea de la vida y la hipótesis de la generación de todo ser vivo a partir de otros seres vivos constituyen un ejemplo de este tipo. Generalmente, las hipótesis rivales son solamente contrarias. Las teorías astronómicas enfrentadas en el siglo XVI proporcionan un buen ejemplo de este tipo de teorías rivales. Los sistemas de Tolomeo y Copérnico son teorías rivales incompatibles, pero susceptibles de ser ambas falsas. Por otra parte, no son exhaustivas del dominio de posibilidades, como lo muestra la existencia del sistema de Tycho Brahe. Muchos otros sistemas planetarios posibles son concebibles (aunque puede ser muy difícil inventar algunos que sean empíricamente adecuados, esto es, compatibles con todas las observaciones astronómicas disponibles), y también es concebible que los sistemas tolemaico, copernicano y tychónico sean todos ellos falsos.

En un experimento crucial se debe encontrar algún conjunto de condiciones iniciales C tales que una de las teorías rivales implique que en dichas condiciones se producirá un evento del tipo e_1 , mientras que la otra teoría implique que en esas mismas condiciones se producirá un evento diferente de tipo e_2 (siendo e_1 y e_2 oraciones que describen dos eventos incompatibles, esto es, que no pueden ocurrir simultáneamente). El experimento crucial consistirá, entonces, en producir las condiciones C y determinar si ocurre alguno de los dos eventos. Llamaré *predicciones* a las oraciones condicionales que tienen la forma $C \rightarrow e$, y *predicciones rivales* a aquellas de la forma $C \rightarrow e_1$ y $C \rightarrow e_2$. Así, un experimento crucial puede caracterizarse como aquél en el que se contrastan simultáneamente dos predicciones rivales, cada una implicada por una teoría rival diferente.³

² En adelante, salvo que lo indique expresamente, emplearé los términos teoría e hipótesis como sinónimos. Aceptaré también la concepción tradicional de las teorías como conjuntos de hipótesis cerrados respecto de la relación de consecuencia lógica.

³ Las oraciones que llamo predicciones también han recibido otros nombres, como implicaciones contrastadoras.

Tradicionalmente, se ha concebido a los experimentos cruciales en términos de refutación y verificación de hipótesis rivales. Esta idea todavía se encuentra vigente. Un glosario de epistemología caracteriza a los experimentos cruciales como aquellos que “proporcionan la oportunidad de establecer decisivamente la verdad o falsedad de hipótesis o teorías alternativas” (Fetzer y Almeder, 1993, p. 33). Esta es una concepción extremadamente fuerte de los experimentos cruciales, ya que requiere condiciones muy estrictas que raramente se presentan en la práctica de la ciencia. Este tipo de experimento crucial es posible, en principio, entre dos hipótesis rivales que sean contradictorias entre sí (esto es, cuando H_1 implica $\neg H_2$ y, a su vez, H_2 implica $\neg H_1$). En ese caso, la refutación de una de las dos hipótesis implica la verificación de la otra, es decir, si se prueba que una de ellas es falsa, se habrá probado que la otra es verdadera (y ello por razones puramente lógicas).⁴ No obstante, hay límites lógicos para la refutación y la verificación. Si una de las hipótesis rivales es universal (irrestringida) no será verificable. Además, su contradictoria es existencial, por lo que no será refutable. Por último, si una hipótesis es a la vez universal y existencial, ni ella ni su contradictoria son susceptibles de ser verificadas o refutadas.⁵

En cambio, si las dos hipótesis rivales no son contradictorias, de la refutación de una de ellas nada se sigue acerca de la verificación de la otra, ya que podrían ser ambas falsas. La única manera de garantizar la verdad de una de ellas, sería disponer de un conjunto finito y exhaustivo de hipótesis rivales, H_1, H_2, \dots, H_k . En tal caso, si se refutan todas las hipótesis del conjunto excepto una, se puede concluir válidamente que la hipótesis no refutada ha sido verificada. No obstante, dado que, en principio al menos, siempre existe un número indeterminado de hipótesis rivales no contradictorias entre sí, nunca es posible asegurarse de que las hipótesis en disputa constituyen todas las hipótesis rivales posibles. Si las rivales son potencialmente infinitas, la empresa es imposible por principio. Pero incluso aunque las alternativas fueran finitas en número, nunca podríamos garantizar en un momento determinado que las hayamos conocido todas. En síntesis, un experimento crucial sólo puede verificar una de las hipótesis rivales cuando se enfrentan dos hipótesis contradictorias, o bien cuando se enfrentan dos o más hipótesis contrarias que son conjuntamente exhaustivas del dominio de hipótesis rivales posibles. Ninguna de las dos situaciones es muy frecuente en la ciencia.

La situación más común en la ciencia es que se contrasten dos o más teorías rivales que no son contradictorias entre sí (cuando se las toma de dos en dos) ni exhaustivas del dominio de posibilidades. En ese caso, un experimento crucial nunca podrá verificar una de tales teorías; a lo sumo, podrá refutar a todas las riva-

⁴ Supondremos que la lógica subyacente al análisis de las experiencias cruciales es siempre clásica.

⁵ Así, la hipótesis $(\forall x)(\exists y)(Rxy)$ tiene como contradictoria a $(\exists x)(\forall y)(\neg Rxy)$. Ninguna de las dos es verificable ni refutable, pero, en principio, ambas podrían ser contrastadas por la experiencia.

les conocidas en un momento determinado, dejando abierta la posibilidad de que se inventen otras teorías rivales. Con todo, comoquiera que se relacionen las hipótesis o teorías rivales, la posibilidad de que haya experimentos cruciales, en la concepción tradicional de éstos, depende de que sea posible refutar hipótesis, o, al menos, teorías tomadas como un todo.⁶ La célebre crítica de Pierre Duhem a los experimentos cruciales, que analizaré en la sección siguiente, cuestiona precisamente este punto. Desde entonces, la discusión acerca de los experimentos cruciales por parte de los filósofos de la ciencia ha girado predominantemente en torno del problema de si es posible probar la falsedad de las hipótesis científicas.⁷

En este trabajo quiero argumentar a favor de la existencia de experimentos cruciales, pero concebidos de una manera más débil que la tradicional que acabo de describir. No exigiré de los experimentos cruciales que sean capaces de verificar una de las teorías rivales en disputa, ni tampoco de refutar a las restantes. Consideraré crucial a todo experimento que contraste simultáneamente dos o más teorías rivales. Además, llamaré experimento crucial exitoso a aquél que proporciona una evidencia que confirma a una, y sólo una, de las teorías rivales a la vez que disconfirma a las restantes.⁸ Si hay más de dos hipótesis rivales en disputa, admitiré que la condición mínima para considerarlo exitoso es que disconfirme al menos una de tales hipótesis. Por último, consideraré que un experimento crucial fracasa cuando confirma a todas las hipótesis rivales, o bien cuando las disconfirma a todas.

2. La crítica de Duhem

La crítica de Duhem a los experimentos cruciales es una consecuencia de su holismo epistemológico. La formuló en una fecha tan temprana como 1894 y la popularizó en su famoso libro sobre la teoría física, donde expuso casi sin cambios las ideas de su artículo inicial sobre el tema (Duhem, 1894 y 1906, respectivamente). Duhem se dio cuenta de que, en el campo de la física teórica, las teorías no tienen consecuencias observacionales por sí mismas a menos que se las ponga en conjunción con un amplio conjunto de hipótesis auxiliares y teorías presupuestas.

⁶ Popper, por ejemplo, definió al experimento crucial como “uno que es diseñado para refutar una teoría (si es posible) y más especialmente uno que es diseñado para producir una decisión entre dos teorías en competencia refutando (al menos) una de ellas- sin, por supuesto, probar la otra.” (Popper, 1959, p. 277, nota 2, agregada a la segunda edición en inglés).

⁷ La obra de Harding (1976) contiene una selección de trabajos que siguen este enfoque. Rivadulla (2004), cap. 3, ha defendido la existencia de experimentos cruciales en un sentido cercano al tradicional, es decir, como aquellos que refutan todas las teorías rivales en disputa en un momento dado, excepto una de ellas, que resulta corroborada. Es una concepción muy cercana al modelo falsacionista de Popper.

⁸ Las nociones de confirmación y disconfirmación se explican en la sección 5.

Solamente el sistema total de hipótesis implica consecuencias que pueden contrastarse mediante la experiencia. La confirmación o refutación de cualquier sistema de hipótesis es, por consiguiente, puramente global y no puede distribuirse a sus partes componentes. Por tanto, no es posible confirmar o refutar hipótesis o incluso teorías aisladas y, como consecuencia de ello, sostuvo Duhem, no son posibles los experimentos cruciales entre hipótesis o teorías rivales.

Duhem reconoció explícitamente que sus conclusiones se aplicaban solamente a las teorías de la física teórica, o bien a otras que emplean hipótesis de la física teórica, pero no a todas las teorías científicas, ni mucho menos a la ciencia en general. Las hipótesis puramente empíricas, aunque sean de forma universal, están exentas del alcance de su tesis, ya que se pueden confirmar o refutar por sí mismas. El holismo de Duhem es de un alcance restringido y no se extiende a la totalidad de la ciencia, ni tampoco a la matemática o al conocimiento de sentido común. Duhem caracterizó a la unidad mínima susceptible de contrastación, de una manera un tanto vaga, como “todo un conjunto teórico” (Duhem, 1906, p. 278) o bien como “todo un conjunto de hipótesis” (Duhem, 1906, p. 284). A partir de sus propios ejemplos se puede concluir que pensaba en teorías completas, como las teorías corpuscular y ondulatoria de la luz, posiblemente junto con determinadas hipótesis auxiliares, pero no en sistemas teóricos más amplios, como una rama entera de la física o una disciplina científica en su totalidad. Finalmente, Duhem nunca sostuvo que una teoría pudiera inmunizarse contra toda refutación y retenerse indefinidamente frente a la acumulación de evidencias desfavorables. En un momento dado, las sucesivas reparaciones de una teoría afectan la arquitectura de todo el edificio volviéndola excesivamente complicada y poco manejable. En ese momento, el buen sentido de los científicos debería aconsejar el abandono de la teoría (Duhem, 1906, pp. 329-332).⁹

Se puede resumir la posición de Duhem mediante las siguientes tesis:

D₁) Tesis de la falta de contenido empírico: las hipótesis de la física teórica no tienen por sí mismas contenido empírico porque no implican consecuencias observacionales.

D₂) Tesis de la no separabilidad: las hipótesis de la física teórica no pueden contrastarse por medio de la experiencia de manera aislada, sino como partes inseparables de sistemas teóricos más amplios.

D₃) Tesis de la no falsabilidad: ninguna experiencia puede refutar una hipótesis teórica en particular, sino sólo un sistema teórico como un todo. La falsedad del sistema global no puede distribuirse a sus elementos componentes.

D₄) Tesis de la imposibilidad de experimentos cruciales: los experimentos cruciales entre hipótesis teóricas rivales no son posibles porque el resultado de un

⁹ Ariew (1982) es un claro examen del holismo de Duhem, en el cual me apoyo en esta sección.

experimento sólo puede refutar o bien una hipótesis empírica o bien todo un sistema teórico.

D₅) Tesis del alcance restringido: el holismo de la confirmación sólo se aplica a las hipótesis de la física teórica o a otras teorías científicas que emplean hipótesis físicas como auxiliares.

D₆) Tesis de la revisión de teorías: el buen sentido de los científicos debe decidir cuándo una determinada hipótesis perteneciente a una teoría globalmente refutada debe abandonarse o reemplazarse.

El presupuesto básico sobre el que se apoya el holismo epistemológico de Duhem es una concepción deductivista de la confirmación, según la cual una teoría sólo puede contrastarse verificando o falsando las consecuencias observacionales que se deducen de ella. De esta manera, si una hipótesis teórica no implica ningún enunciado de observación, entonces, no tiene contenido empírico y no puede ser contrastada por la experiencia. Esta es una idea característica del método hipotético-deductivo, que es la teoría de la confirmación que Duhem suscribe implícitamente.¹⁰ Así, pues, la crítica de Duhem a los experimentos cruciales es una consecuencia de su holismo epistemológico y éste, a su vez, es una consecuencia de su concepción estrictamente deductivista de la confirmación.

El resultado más importante del holismo de Duhem no es, como suele afirmarse, que no sea posible refutar hipótesis individuales aisladas. El punto fundamental es que tampoco es posible refutar teorías enteras tomadas como un todo, ya que siempre se requieren para ello hipótesis auxiliares que no pertenecen a dicha teoría.

3. Popper y la tesis de Duhem-Quine

La tesis holista de Duhem fue generalizada por Quine, quien consideró que toda vez que se contrasta empíricamente una teoría, el sistema de hipótesis que se pone a prueba no sólo incluye a dicha teoría, junto con ciertas hipótesis auxiliares, sino también amplias porciones del conocimiento matemático y del conocimiento de sentido común.¹¹ Quine excluyó de este sistema a la propia lógica subyacente empleada en la deducción de las consecuencias observacionales de la teoría. Si bien reconoció que nunca se pone en juego la totalidad del conocimiento en un experimento dado, admitió que, en principio, la refutación de una cierta predicción puede

¹⁰ Esta teoría de la confirmación se analiza más adelante, en la sección 5.

¹¹ Quine presentó la tesis holista, en su forma más radical, en Quine (1951), pero la reformuló en términos más precisos y restringidos en Quine (1992), cap. 2. Aquí sigo preferentemente esta última obra. Se piensa a menudo que el holismo de Quine implica otra consecuencia, la llamada subdeterminación de la teoría por la experiencia; pero esta es una tesis muy diferente del holismo epistemológico, como advirtió el propio Quine (1975, p. 313).

llevar a la revisión de amplias porciones del conocimiento presupuesto, incluso la propia matemática empleada por una teoría física. A partir de esta concepción holista de la contrastación de teorías, Quine concluyó que cualquier hipótesis o teoría en particular puede retenerse frente a una experiencia aparentemente refutatoria si se hacen cambios suficientes en otras partes del sistema de hipótesis que se ha puesto a prueba.

Por ejemplo, si un cierto sistema de hipótesis S_1 implica una determinada evidencia E (donde E es una enunciado observacional que tiene la forma de una predicción) y dicha evidencia es falsada por la experiencia, esto es, $\neg E$ resulta verificada, es posible retener cualquier hipótesis H_i perteneciente a S_1 eliminando o reemplazando algunas hipótesis de dicho sistema. No es necesario, sin embargo, que el nuevo sistema revisado S_2 implique $\neg E$ (lo cual transformaría a la evidencia refutadora de S_1 en evidencia confirmadora de S_2) sino que es suficiente que no implique E , desactivando de ese modo la refutación. Esta estrategia es siempre posible desde un punto de vista lógico, aunque sólo sea por el hecho de contraer el sistema en cuestión, quitando de él algunas hipótesis auxiliares necesarias para deducir la consecuencia refutadora. De esta manera, toda teoría o hipótesis específica puede salvarse de la refutación, por lo que ninguna de ellas resulta falsable en la práctica. No obstante, la reparación de un sistema refutado, restaurando su adecuación empírica, puede acarrear costos considerables respecto de otras virtudes epistémicas, tales como la simplicidad, la generalidad, y la fertilidad explicativa y/o predictiva, como admitió el propio Quine.¹²

La posición holista respecto de la contrastación recibió el nombre genérico de “tesis de Duhem-Quine”, una denominación que todavía se emplea, aunque, dadas las importantes diferencias que existen entre las posiciones de Duhem y de Quine no resulta particularmente apropiada.¹³

Frecuentemente se ha considerado que la tesis de Duhem-Quine constituye una seria dificultad para la concepción falsacionista de la ciencia de Popper. Sin embargo, el propio Popper rechazó de manera sistemática la idea de que el holismo epistemológico tuviera consecuencias fatales para el falsacionismo. Replicó a Duhem afirmando que cuando se contrastan teorías rivales, efectivamente se lo hace sobre la base de un conocimiento antecedente que puede incluir porciones amplias de una ciencia determinada, de modo que, en caso de que se produzca la refutación de una de las teorías, ésta incluirá necesariamente a ese conocimiento antecedente. Popper admitió, entonces, que la refutación es global y que no es posible afirmar “la refu-

¹² Por ejemplo, Quine & Ullian (1978), caps. 6 y 8.

¹³ Las diferencias entre el holismo restringido de Duhem y el holismo generalizado de Quine están bien descritas en Gillies (1993) pp. 98-116. Quine (1975, p. 313) advirtió que el holismo epistemológico debería llamarse la tesis de Duhem y que sólo de una manera más bien generosa se la llama tesis de Duhem-Quine. Entre los muchos trabajos que discuten esta tesis véase Balashov (1994).

tación de una teoría como tal, sino la de la teoría junto con el conocimiento antecedente” (Popper, 1963, p. 112). Por otra parte, replicó a Quine sosteniendo que, al menos en algunos casos, “es posible encontrar cuál es la hipótesis responsable de la refutación”, es decir, “qué grupo de hipótesis fue necesario para la derivación de la predicción refutada” (Popper, 1963, p. 239). Esto puede hacerse, según Popper, si se tiene una teoría empírica finitamente axiomatizada mediante un conjunto de axiomas independientes. En ese caso, la revisión de la teoría implicará necesariamente algún cambio en la base axiomática, pero, en principio, puede determinarse cuáles son los axiomas que implican la consecuencia falsa. Aunque alguno de dichos axiomas tendrá que ser revisado, podrán mantenerse sin cambios los restantes. Si la teoría no está axiomatizada, el descubrimiento de las hipótesis responsables de la refutación puede resultar mucho más difícil. Popper reconoció que en la práctica la refutación de una teoría es a menudo dificultosa y puede llevar mucho tiempo, pero a la vez admitió la existencia de numerosos ejemplos de refutaciones exitosas en la historia de la ciencia moderna, muchas de ellas como resultado de experimentos cruciales.¹⁴

Popper aceptó, entonces, una de las tesis principales del holismo de Duhem: que no es posible contrastar hipótesis ni teorías aisladas, por lo que, *a fortiori*, tampoco es posible falsarlas. La refutación de una teoría debe ser global y compromete a un conjunto amplio de conocimiento teórico y empírico, que Popper dejó indeterminado llamándolo simplemente conocimiento antecedente. Este conocimiento antecedente, sin duda, no forma parte de la teoría que se contrasta, ya que incluye hipótesis auxiliares que habitualmente pertenecen a diferentes teorías, incluso a porciones de disciplinas en ciencias diferentes. Popper no sostuvo, sin embargo, que el conocimiento antecedente se considerara establecido en ningún sentido del término, ni que estuviera fuera de juego en el proceso de contrastación de una teoría determinada. Como todo conocimiento, se lo acepta tentativamente y es susceptible de ser revisado, pero sólo de manera local o parcial. Si se diseñan otros experimentos cruciales entre hipótesis auxiliares alternativas, alguna de ellas puede hallarse como responsable de la refutación de una teoría. Cualquier hipótesis auxiliar o teoría presupuesta puede a su vez contrastarse, pero nunca de manera aislada, por lo que también esas contrastaciones emplearán algún conocimiento antecedente susceptible de ser revisado. Por principio, esta posibilidad de revisión no tiene un final previsible.¹⁵

El hecho de que Popper acepte el holismo de la contrastación, aunque sea en una forma moderada, plantea dudas acerca de si realmente ha proporcionado una res-

¹⁴ Popper (1983, pp. XXVI-XXX) ofreció una lista heterogénea de 20 casos de hipótesis o teorías refutadas. Señaló allí que en muchos casos la refutación no fue instantánea, sino que requirió un tiempo considerable para ser aceptada.

¹⁵ El hecho de que el conocimiento antecedente pueda revisarse por partes (*piecemeal*, dice Popper, 1989, p. 238) muestra que el holismo de Popper no es generalizado, sino de carácter más bien restringido.

puesta al argumento de Duhem, es decir, si ha preservado la posibilidad de refutación de *teorías específicas*.¹⁶ Hay razones para pensar que no lo consiguió. El conocimiento antecedente que se emplea en una contrastación experimental generalmente es de carácter heterogéneo e incluye hipótesis pertenecientes a diversas teorías diferentes. Las hipótesis auxiliares que se emplean para deducir una consecuencia observacional de una teoría, por definición, no pertenecen a dicha teoría (pues, de otro modo, no serían auxiliares). Por consiguiente, el sistema formado por la teoría T que se quiere contrastar junto con las hipótesis auxiliares A no constituye una teoría. Entonces, si sólo es refutable el sistema formado por T en conjunción con A , no es posible refutar T por sí misma, incluso globalmente. El mismo argumento se aplica si el sistema en cuestión contiene sólo una subteoría de T o cualquier conjunto finito de hipótesis pertenecientes a T . Este es el núcleo de la tesis de Duhem-Quine.

En varias ocasiones Popper parece haber sostenido que es posible concluir la refutación de una teoría a partir de un experimento crucial. Esto ocurriría cuando las teorías rivales emplean el mismo conocimiento antecedente, de modo que los sistemas de hipótesis que se contrastan sólo difieren respecto de las teorías o hipótesis rivales en disputa.¹⁷ Pero, si ese fuera su argumento, resultaría inválido por el simple hecho de que a partir de premisas falsas es posible inferir tanto conclusiones verdaderas como falsas. En efecto, si el conjunto A de las hipótesis auxiliares es falso (esto es, si contiene al menos una hipótesis falsa), desde un punto de vista lógico es posible que una teoría falsa T_1 en conjunción con A implique una evidencia verdadera E_1 , mientras que una teoría rival verdadera T_2 en conjunción con A implique una evidencia falsa E_2 . Así pues, del hecho de que los dos sistemas de hipótesis $S_1 = (A \ \& \ T_1)$ y $S_2 = (A \ \& \ T_2)$ compartan las mismas hipótesis auxiliares nada se sigue acerca de la refutación de ninguna de las dos teorías T_1 y T_2 *por sí mismas*, y lo mismo vale para el caso de hipótesis específicas.¹⁸ Por otra parte, en razón de la clausura lógica, dos teorías no pueden diferir entre sí en una sola hipótesis: si hay una hipótesis que no tienen en común, entonces, deben diferir en un número infini-

¹⁶ Este es un punto que ya Harding (1976, p. XV) había advertido.

¹⁷ El pasaje más explícito de Popper es el siguiente: “En cuanto a la famosa crítica de Duhem a los experimentos cruciales, él sólo muestra que los experimentos cruciales nunca pueden probar o establecer una teoría; pero en ningún lugar muestra que los experimentos cruciales no pueden refutar una teoría. Por cierto, Duhem tiene razón cuando dice que podemos contrastar sólo sistemas teóricos enormes y complejos más bien que hipótesis aisladas; pero si contrastamos dos de tales sistemas que difieren sólo en una hipótesis, y si podemos diseñar experimentos que refutan el primer sistema mientras que dejan al segundo muy bien corroborado, entonces, podemos estar en un terreno razonablemente seguro si atribuimos el fracaso del primer sistema a esa única hipótesis en la cual éste difiere del otro.” (Popper, 1957, p. 122 nota 31). Una afirmación similar, aunque más breve, se encuentra en Popper (1963, p. 112).

¹⁸ Para un intento de resolver el problema de Duhem sobre la base de la teoría popperiana del grado de corroboración véase Rowbottom (2010). Es sabido que la teoría del grado de corroboración de Popper presenta serias dificultades, pero aquí no es posible discutir este punto.

to de hipótesis. Por consiguiente, cuando se contrastan teorías nunca puede presentarse el caso de dos sistemas teóricos que difieran en sólo una hipótesis de cada teoría rival.¹⁹

4. La confirmación por implicación

Tanto Duhem como Quine y Popper adhirieron a una concepción puramente deductivista de la contrastación, de acuerdo con la cual una teoría se pone a prueba exclusivamente por medio de las predicciones que se deducen de ella.²⁰ Las propiedades esenciales de esta concepción se pueden expresar mediante dos condiciones: i) E confirma H si y sólo si $H \models E$ y ii) $\neg E$ refuta H si y sólo si $H \models E$ (donde H es un conjunto de hipótesis y E es un conjunto finito de enunciados observacionales).²¹ Toda la discusión acerca de la posibilidad de falsación de teorías e hipótesis ha presupuesto estas dos condiciones, de manera implícita, como es el caso de Duhem, o de manera explícita, como ocurre con Quine y Popper. No obstante, para discutir la lógica de los experimentos cruciales no es necesario aceptar las condiciones del hipotético-deductivismo que suscriben Duhem, Popper y Quine, sino sólo dos condiciones lógicamente más débiles, pero implicadas por aquéllas: i') $(H \models E) \rightarrow (E \text{ confirma } H)$ y ii') $(H \models E) \rightarrow (\neg E \text{ refuta } H)$. Parece difícil recusar cualquiera de estas dos condiciones, que son sumamente razonables, ya que se emplean habitualmente en la práctica de la contrastación científica y no tienen contraejemplos conocidos. Por otra parte, resultan válidas no sólo para la confirmación hipotético-deductiva, sino también para toda teoría probabilista de la confirmación. En efecto, los enunciados condicionales $(H \models E) \rightarrow \Pr(H|E) \geq \Pr(H)$, y $(H \models E) \rightarrow \Pr(H|\neg E) = 0$ son teoremas del cálculo *standard* de probabilidades (en la formulación de Kolmogorov o en cualquier otra equivalente a ésta). Éstos expresan, respectivamente, las nociones de confirmación incremental y de refutación de una hipótesis o teoría por parte de cierta evidencia. Las conversas de esos enunciados, en cambio, no son teoremas de la teoría de la probabilidad, por lo que cualquier teo-

¹⁹ Este hecho puede advertirse más claramente en el caso de teorías axiomatizadas: dos teorías diferentes no pueden diferir en un único teorema. Si hay un teorema que no tienen en común, necesariamente debe haber al menos un axioma que no comparten; y de ello se sigue que hay infinitos teoremas que no tienen en común.

²⁰ Así, Quine (1992, p. 12) afirma: "La contrastación observacional de las hipótesis científicas, y en verdad, de las oraciones en general, consiste en contrastar las categóricas observacionales que ellas implican". Quine llama categóricas observacionales a las oraciones condicionales de la forma $C \rightarrow e$, a las que denominé predicciones.

²¹ En el caso de Popper, la condición i) debe expresarse empleando el concepto de corroboración, en vez del de confirmación, pero ello no implica ninguna diferencia en cuanto a la estructura lógica de la corroboración.

ría probabilista de la confirmación es incompatible con el concepto hipotético-deductivista de confirmación.

La principal teoría probabilista de la confirmación actualmente vigente es la bayesiana.²² Si se acepta, como ocurre en esta teoría, que una evidencia puede confirmar o disconfirmar una hipótesis aunque no esté implicada por ella, un experimento resulta crucial si proporciona una evidencia que aumenta la probabilidad de una hipótesis y, a la vez, disminuye la probabilidad de las demás rivales. En términos formales, E es una evidencia crucial respecto de las hipótesis rivales H_1 y H_2 si y sólo si, $\Pr(H_1 | E \& K) > \Pr(H_1 | K)$ y $\Pr(H_2 | E \& K) < \Pr(H_2 | K)$, o bien, $\Pr(H_1 | E \& K) < \Pr(H_1 | K)$ y $\Pr(H_2 | E \& K) > \Pr(H_2 | K)$ (donde K es el conocimiento antecedente). Un experimento crucial todavía puede considerarse exitoso si la probabilidad de una de las hipótesis rivales permanece igual, mientras que la probabilidad de la otra sube o baja de manera significativa. Esto es, si $\Pr(H_1 | E \& K) \gg \Pr(H_1 | K)$ y $\Pr(H_2 | E \& K) = \Pr(H_2 | K)$, o bien, $\Pr(H_1 | E \& K) = \Pr(H_1 | K)$ y $\Pr(H_2 | E \& K) \gg \Pr(H_2 | K)$. En estos casos, sin embargo, puede haber un margen de incertidumbre respecto del éxito del experimento crucial, dependiendo de cuánto haya sido el aumento de una de las probabilidades. Aún es posible una concepción más débil de experimento crucial: cuando la evidencia obtenida confirma más a una de las hipótesis rivales o cuando la disconfirma menos. Esto es, cuando ocurre que $\Pr(H_1 | E \& K) > \Pr(H_1 | K)$ y $\Pr(H_2 | E \& K) > \Pr(H_2 | K)$, pero $(\Pr(H_1 | E \& K) - \Pr(H_1 | K)) > (\Pr(H_2 | E \& K) - \Pr(H_2 | K))$ (o bien a la inversa); o cuando ocurre que $\Pr(H_1 | E \& K) < \Pr(H_1 | K)$ y $\Pr(H_2 | E \& K) < \Pr(H_2 | K)$, pero $(\Pr(H_1 | K) - \Pr(H_1 | E \& K)) > (\Pr(H_2 | K) - \Pr(H_2 | E \& K))$ (o bien a la inversa). En estos casos, sin embargo, creo que lo más razonable es admitir que se trata de experimentos cruciales fallidos.

En las teorías cualitativas de la confirmación, como la del método hipotético-deductivo, no es posible distinguir entre la refutación y la disconfirmación de una hipótesis. En cambio, en una teoría cuantitativa como la bayesiana, la diferencia entre refutación y disconfirmación puede caracterizarse de manera precisa. Una evidencia E refuta a una hipótesis H si y sólo si $\Pr(H | E) = 0$. En cambio, una evidencia E disconfirma a una hipótesis H si y sólo si $\Pr(H | E \& K) < \Pr(H | K)$. Se advierte que la refutación es un caso límite de la disconfirmación, aquél en que la evidencia disminuye la probabilidad previa de la hipótesis a cero, pero también es claro que son posibles muchos casos de disconfirmación de una hipótesis que no implican su refutación.

En el marco de una teoría deductivista de la confirmación, los experimentos cruciales son los que refutan una de dos teorías rivales y confirman (o corroboran)

²² Para una comparación detallada de las teorías de la confirmación hipotético-deductiva y bayesiana véase Cassini (2003).

la otra. En las teorías probabilistas de la confirmación, es posible un concepto más amplio de experimento crucial, entendido como aquél que confirma una de las teorías rivales y disconfirma la otra.²³ En el marco de estas teorías de la confirmación el problema de Duhem se disuelve cuando la evidencia no está implicada por ninguna de las teorías rivales, ya que en ese caso las hipótesis auxiliares son innecesarias. La teoría bayesiana, por ejemplo, admite que una determinada evidencia sea crucial entre dos hipótesis rivales, a pesar de que no sea predicha por ninguna de ellas. Por cierto, la existencia de esta clase de evidencia no puede garantizarse *a priori* para todas las teorías rivales, pero, en principio al menos, resulta posible. Para el deductivismo, en cambio, sólo las predicciones deducidas de una teoría son las que permiten contrastarla, por lo cual, si una evidencia no está implicada por ninguna de las teorías rivales es irrelevante para cualquier experimento crucial que pueda concebirse entre ellas. En el marco de una teoría probabilista de la confirmación, el problema de Duhem sólo se plantea para el caso de la contrastación deductiva de teorías rivales, esto es, cuando las hipótesis auxiliares son indispensables para deducir la evidencia.²⁴ Para este caso particular, que llamaré *confirmación por implicación*, sólo hay dos resultados posibles: si la evidencia es verdadera, el sistema de hipótesis del cual se la ha deducido queda confirmado; si, en cambio, la evidencia es falsa, dicho sistema de hipótesis queda refutado.

La estructura general de un experimento crucial para el caso de la contrastación de teorías mediante predicciones es, entonces, la siguiente. Dadas dos teorías rivales T_1 y T_2 , dos conjuntos de hipótesis auxiliares (no necesariamente diferentes) A_1 y A_2 , un conjunto de condiciones iniciales C y dos enunciados que describen eventos incompatibles e_1 y e_2 , se tienen dos predicciones cruciales si $(T_1 \& A_1) \models (C \rightarrow e_1)$ y $(T_2 \& A_2) \models (C \rightarrow e_2)$. Suponiendo que se verifican las condiciones iniciales C , comunes a las dos predicciones, si también se verifica el enunciado e_1 , el sistema de hipótesis $S_1 = (T_1 \& A_1)$ queda globalmente confirmado (o corroborado) y el sistema de hipótesis $S_2 = (T_2 \& A_2)$ queda globalmente refutado. La situación inversa se produce en caso de que se verifique el enunciado e_2 . Si no se verifican ni e_1 ni e_2 , el experimento crucial fracasa y ninguno de los dos sistemas de hipótesis resulta confirmado ni refutado. Dado que la confirmación y la refutación son globales, no pueden distribuirse a las partes componentes de un sistema de hipótesis.

²³ Para una concepción de los experimentos cruciales en otro marco epistemológico, el de la inferencia a la mejor explicación, véase Weber (2009).

²⁴ La respuesta bayesiana al holismo epistemológico consiste en distribuir los grados de confirmación de manera desigual entre la hipótesis que se quiere contrastar y las hipótesis auxiliares de un sistema. Las líneas generales de esta estrategia las propuso Dorling (1979) y luego las perfeccionaron muchos otros autores bayesianos, como Strevens (2001). Podría pensarse que se trata de una evasión del problema, más que de una solución, dado que el holista niega por principio la posibilidad de distribuir los grados de confirmación, pero este es un punto que no puede discutirse aquí.

Así, por ejemplo, si se refuta el sistema $(T_I \& A_I)$, no puede inferirse la falsedad de ninguna hipótesis en particular, sino sólo la de la conjunción de todas ellas (es decir, $\neg(T_I \& A_I)$), lo cual equivale a $(\neg T_I \vee \neg A_I)$). Por tanto, sólo puede concluirse lógicamente que al menos una hipótesis del sistema es falsa, pero no es posible determinar cuál o cuáles. Frecuentemente, una predicción determinada no se deduce sólo de $(T \& A)$, sino que, además, se requiere todo un cuerpo de conocimientos antecedentes K , que incluye teorías presupuestas que no se quieren contrastar en un experimento determinado, así como enunciados de condiciones iniciales y de contorno.²⁵ Puede ser una mera cuestión de convención cómo se distribuya entre A y K el conocimiento presupuesto. Para los fines de nuestro análisis omitiremos K y consideraremos que A contiene toda la información requerida para deducir una predicción determinada de $(T \& A)$.

La contrastación de una teoría mediante las predicciones deducidas de ella tiene importancia innegable y se presenta habitualmente en la práctica de la ciencia. Los experimentos cruciales, por su parte, se concibieron generalmente en el marco de la confirmación por implicación, a la que me atendré para analizar el siguiente caso histórico.

5. Los experimentos de Fizeau y Foucault de 1850

Uno de los ejemplos que Duhem invocó en su crítica a los experimentos cruciales es el experimento concebido por Arago en 1838 y realizado por Fizeau y Foucault en 1850 con el objetivo de contrastar dos predicciones rivales deducidas de las teorías corpuscular y ondulatoria de la luz (Duhem, 1906, pp. 282-289). El experimento ya había sido analizado en términos epistemológicos por Jevons (1873, pp. 520-522) y durante mucho tiempo fue considerado como un ejemplo paradigmático de experimento crucial. Quiero volver a analizar ahora este experimento con cierto detalle con el fin de mostrar que la manera en que lo interpretaron sus propios autores, Fizeau y Foucault, concuerda con la manera en que el propio Duhem dice que debería interpretarse, por lo cual sus propias críticas no están justificadas.

Desde el siglo XVII se sabía que las teorías corpuscular y ondulatoria de la luz hacían predicciones diferentes respecto de la velocidad de la luz en medios transparentes de distinta densidad como el aire y el agua. Según la teoría corpuscular, cuando la luz se refracta al pasar de un medio menos denso a uno más denso, los corpúsculos luminosos sufren la atracción gravitatoria de las partículas del medio más denso y, por tanto, experimentan un determinado incremento de su velocidad. Consiguientemente, la luz debe moverse con mayor velocidad en el agua que en el

²⁵ Klimovsky (1994) caps. 13 y 14 contiene el análisis más detallado que conozco acerca de las diferentes clases de hipótesis que están presupuestas en la contrastación deductiva de una teoría.

aire. Según la teoría ondulatoria, en cambio, al entrar en un medio más denso las ondas luminosas incidentes se dispersan y experimentan una cierta disminución de su velocidad. Por consiguiente, si es una onda, la luz debe moverse con menor velocidad en el agua que en el aire. Las dos predicciones rivales se encuentran ya formuladas, aunque de manera cualitativa, en las dos obras fundadoras de la óptica ondulatoria y corpuscular, el *Traité de la lumière* (1690) de Huygens y la *Opticks* (1704) de Newton.

Las predicciones que se deducen de cada una de las teorías rivales no son puramente cualitativas, sino cuantitativas y exactas: si v_1 es la velocidad de la luz en un medio cualquiera y v_2 es la velocidad de la luz en un medio más denso cuyo índice de refracción es n , entonces, según la teoría corpuscular $v_2 = v_1 \cdot n$, mientras que según la teoría ondulatoria $v_2 = v_1 / n$. Así, conociendo el valor de la velocidad de la luz en el vacío y los índices de refracción del aire y el agua, es posible predecir los valores de las respectivas velocidades de la luz en el agua y en el aire de acuerdo con cada una de las dos teorías rivales. Como se hace habitualmente en la práctica, los números se pueden redondear mediante aproximaciones. Dado que el índice de refracción del aire es muy bajo (1,00029), es posible desprestigiar las cifras que siguen al tercer decimal e igualar este índice de refracción al del vacío (que por definición es igual a 1). Así, para todo fin práctico, se puede considerar que la velocidad de la luz es la misma en los dos medios, por lo que $v_1 = c$. Mediante una nueva aproximación, se puede considerar que el índice de refracción del agua (1,33) se encuentra en una proporción de 3 a 4 con el índice de refracción del aire.²⁶ Por consiguiente, se puede concluir que según la teoría corpuscular la velocidad de la luz en el agua es igual a $4/3c$, mientras que según la teoría ondulatoria es igual a $3/4c$.

Fresnel (1816, pp. 279-280) presentó claramente estas dos predicciones rivales, las cuales ya permiten la posibilidad de un experimento crucial que, sin embargo, no consiguió imaginar. En principio, la determinación de la velocidad de la luz en el agua sería suficiente para verificar una de las predicciones y refutar la otra. La medición no necesitaría ser demasiado precisa, ya que la diferencia entre los valores predichos por cada teoría es muy grande. No obstante, esta clase de experimento de medición no era técnicamente posible, ni siquiera con un alto margen de error, hacia comienzos del siglo XIX. De hecho, tampoco se disponía de ninguna medición de la velocidad de la luz en el agua (eso lo lograría Fizeau recién en 1849).

En 1838 Arago concibió un experimento crucial que permitía comparar las velocidades de la luz en el aire y en el agua. Lo presentó de manera dramática con las siguientes palabras:

²⁶ Aquí también se desprestia el carácter dispersivo del agua, que hace que el índice de refracción sea diferente para cada frecuencia de las ondas, variando desde 1,331 para la luz roja hasta 1,341 para la luz violeta. La diferencia de una centésima no es relevante desde el punto de vista práctico.

Me propongo demostrar [...] cómo es posible decidir, sin equívoco, si la luz se compone de pequeñas partículas que *emanan* de los cuerpos radiantes, como quiere Newton y lo admiten la mayoría de los geómetras modernos, o si, en cambio, es simplemente el resultado de *ondulaciones* de un medio muy raro y muy elástico, que los físicos han convenido en llamar *Éter*. El sistema de experiencias que describiré no permitirá, me parece, hesitar más entre las dos teorías rivales. Zanjará *matemáticamente* (empleo esta expresión a propósito), zanjará matemáticamente una de las cuestiones más grandes y más debatidas de la filosofía natural. (Arago, 1838, p. 954, subrayado por el autor).

El experimento de Arago era, en lo fundamental, el siguiente. Si dos rayos de luz paralelos inciden sobre un espejo fijo, se reflejarán con un ángulo igual al de incidencia y formarán, entonces, dos imágenes perfectamente alineadas. Si el espejo rotara de derecha a izquierda en un ángulo α , ambos rayos se desviarían hacia la izquierda en un ángulo igual a 2α , pero sus imágenes todavía se conservarían alineadas. Supongamos ahora que en el camino del rayo superior se inserta una columna de agua entre la fuente luminosa y el espejo giratorio. En tal caso los rayos no llegarán al espejo simultáneamente, por lo que el rayo que llegue primero se desviará en un ángulo α respecto de la reflexión en un espejo fijo, mientras que el rayo que arribe después se desviará en un ángulo $\beta > \alpha$. De esta manera, las imágenes reflejadas de cada rayo no estarán más alineadas, sino que una de ellas estará más desviada hacia la izquierda que la otra. Si la luz se moviera más rápidamente en el agua que en el aire, la imagen del rayo superior debería aparecer a la izquierda de la del rayo inferior; y a la inversa si la luz se moviera más rápidamente en el aire. Arago calculó que un espejo que rotara a 1000 revoluciones por segundo produciría una desviación igual a un ángulo de un minuto en un rayo de luz que atravesara una columna de agua de 28 metros de longitud (Arago, 1838, p. 963). Este ángulo ya era medible con los nuevos instrumentos de precisión disponibles en ese momento, esencialmente, con el micrómetro.

Según Arago, el resultado del experimento crucial decidiría acerca de la verdad de una de las dos hipótesis rivales acerca de la naturaleza de la luz, la hipótesis de la emisión y la hipótesis ondulatoria. Expresó esta idea en términos inequívocos:

¿La imagen rectilínea superior está menos avanzada que la inferior; aparece a su izquierda?

La luz es un cuerpo.

Lo contrario tiene lugar? ¿La imagen se muestra a la derecha?

¡La luz es una ondulación! (Arago, 1838, p. 958; subrayado por el autor).

Arago creía, indudablemente, que el experimento que proponía sería capaz de verificar una de las dos hipótesis rivales y falsar la otra.

Aunque el experimento parecía entonces perfectamente realizable en un laboratorio, recién en 1850 se superaron las dificultades técnicas que permitieron llevarlo a cabo. Lo hicieron, de manera independiente, tanto Foucault como Fizeau y Breguet durante los meses de mayo y junio de 1850. Foucault y Fizeau tuvieron una idea sumamente ingeniosa que mejoraba el diseño del experimento de Arago y permitía observar una desviación más grande entre las imágenes de los dos rayos paralelos. Esta consistió en emplear caminos de desigual longitud para los rayos que atraviesan el aire y el agua. Si el tubo con agua tiene una longitud igual a $\frac{4}{3}$ la longitud del tubo con aire, entonces, según la teoría corpuscular, el tiempo empleado por la luz para recorrer los dos caminos será idéntico y, por tanto, no habrá desviación diferencial en el espejo rotatorio. Las imágenes reflejadas deberán aparecer, entonces, perfectamente alineadas. En cambio, la teoría ondulatoria predice que los tiempos serán diferentes para cada rayo y estarán en una relación de 16 a 9, esto es, el tiempo empleado por la luz en recorrer el tubo con agua será casi el doble que el requerido para atravesar el tubo con aire. La diferencia en la desviación relativa de los rayos será, entonces, proporcional a esta relación y, por consiguiente, mucho más fácilmente observable. La situación es la inversa si la longitud del tubo de agua se fija en $\frac{3}{4}$ de la del de aire, ya que en ese caso la teoría ondulatoria predice que los tiempos serán iguales, mientras que la teoría corpuscular predice que estarán en una relación de 9 a 16.

Debe advertirse que el diseño del experimento es neutral respecto de las teorías corpuscular y ondulatoria de la luz porque no presupone ninguna hipótesis acerca de la naturaleza de la luz, sino sólo hipótesis de la óptica geométrica, junto con otras propias de la mecánica, que se suponen compartidas por los partidarios de las teorías rivales.

El experimento de 1850 consistió en disponer los dos arreglos de los tubos de agua y comprobar cuándo los rayos reflejados aparecían alineados y cuándo no lo hacían. Foucault y Fizeau presentaron sus resultados en la misma sesión histórica de la Academia de Ciencias de París el día 17 de junio de 1850. Foucault, que habló primero, resumió así el resultado de su experimento:

[...] he constatado, por observaciones sucesivas, que la *desviación de la imagen después del recorrido de la luz en el aire es menor que después de su recorrido en el agua*. [...] Además, teniendo en cuenta las longitudes del aire y del agua atravesadas, las desviaciones se han mostrado sensiblemente proporcionales a los índices de refracción.

Y a partir de estas observaciones concluyó que:

Estos resultados acusan una *velocidad de la luz menor en el agua que en el aire*, y confirman plenamente, según los puntos de vista de Arago, las indicaciones de la teoría de las ondulaciones. (Arago, 1850, p. 556, todos los subrayados son del autor).

Fizeau, por su parte, relató las dos experiencias con tubos de distancias desiguales diciendo que:

En la primera disposición <agua 4/3>, la desviación es más grande para el agua que para el aire, y es casi el doble. La diferencia es ya sensible con una velocidad de rotación del espejo de 400 a 500 vueltas por segundo; con una velocidad de 1500 vueltas es completamente evidente.

En la segunda disposición <agua 3/4>, la desviación es la misma para el aire y para el agua, y, cualquiera sea la velocidad del espejo, no hay diferencia sensible entre las dos desviaciones.

Y su conclusión fue más categórica que la de Foucault:

Hemos realizado las dos experiencias y los resultados que hemos obtenido han sido muy netos. Los fenómenos observados están completamente de acuerdo con la teoría de las ondulaciones, y en oposición evidente con la teoría de la emisión. (Fizeau y Breguet, 1850, p. 773).

Tanto Foucault como Fizeau sacaron la conclusión de que sus respectivos resultados experimentales verificaban la predicción de la teoría ondulatoria y refutaban la predicción de la teoría corpuscular. Notemos, sin embargo, que tal conclusión se basa en una comparación puramente cualitativa de las velocidades de la luz en el aire y en el agua. Aunque las dos predicciones cruciales especificaban valores bien determinados para la velocidad de la luz en el agua, en ninguno de los dos experimentos se realiza una medición (directa o indirecta) de tal velocidad. El experimento crucial se consideró exitoso por la sola comprobación de que la velocidad de la luz en el agua es menor que en el aire en un orden de magnitud que es, aproximadamente, inversamente proporcional al índice de refracción del agua, tal como predecía la teoría ondulatoria.

Foucault, sin embargo, advirtió que el experimento podría no ser decisivo si se modificaran algunas hipótesis de la teoría ondulatoria, por ejemplo, las que versan sobre la naturaleza del éter:

Debe señalarse, como lo ha observado Arago [...] que la experiencia, demostrando una velocidad menor en el agua que en el aire, es completamente decisiva y se pronuncia sin apelación entre los dos sistemas. Si se hubiese encontrado un resultado inverso, la teoría de Newton todavía sería sostenible, pero la teoría de las ondulaciones no habría sido necesariamente derrocada, considerando que es posible constituir el éter de manera que explique, cualquiera que fuese el sentido, el cambio de velocidad por medio del cambio de medio. (Foucault, 1850, p. 557).

En efecto, uno podría concebir al éter de manera tal que aumentara la velocidad de la luz al entrar a un medio más denso, suponiendo que el éter en el interior del agua tiene propiedades diferentes de las del éter en el aire. Pero también sería posible enmendar la teoría corpuscular, por ejemplo, modificando una teoría presupuesta como la de la gravitación universal. Podría suponerse, entonces, que la fuerza de gravedad, no siempre es atractiva, sino que se vuelve repulsiva a escala microscópica. Y esa repulsión, a su vez, podría ajustarse *ad hoc* para que la velocidad de la luz en el agua en vez de ser igual a $c.n$ resulte igual a c/n . Por cierto, esta sería una maniobra de alto costo, ya que no implicaría la modificación de una teoría acerca de la naturaleza de la luz, sino la de otra teoría mucho más fundamental, como la de la gravitación universal. Sin embargo, en principio, nada impide realizar esta maniobra si se está dispuesto a pagar el costo que ella introduce en otras partes de la física. Observemos, por último, que Foucault afirma explícitamente que el experimento es crucial entre dos *sistemas* de hipótesis, y no entre las hipótesis corpuscular y ondulatoria por sí mismas.

6. Duhem contra Fizeau y Foucault

Duhem sostuvo que este experimento crucial de Fizeau y Foucault no podía decidir entre las hipótesis rivales aisladas acerca de si la luz se compone de corpúsculos o de ondas, que son dos hipótesis teóricas sin consecuencias observacionales, sino entre dos teorías completas acerca de la naturaleza de la luz, la teoría corpuscular y la teoría ondulatoria. Al respecto se expresó de esta manera:

Lo que hemos dicho [...] muestra cuánto se engañaría uno atribuyendo a la experiencia de Foucault una significación tan simple y un alcance tan decisivo; no es entre dos hipótesis, la hipótesis de la emisión y la hipótesis de las ondulaciones, que corta la experiencia de Foucault; es entre dos conjuntos teóricos, cada uno de los cuales debe ser tomado en bloque, entre dos sistemas completos, la Óptica de Newton y la Óptica de Huygens. (Duhem, 1906, p. 287).

Consideremos nuevamente las predicciones que se pusieron a prueba en el experimento. Se trata de dos hipótesis empíricas: una según la cual la velocidad de la luz en el agua es (aproximadamente) igual a c/n y otra según la cual dicha velocidad es igual a $c.n$. El experimento de Fizeau y Foucault verificó, más allá de toda duda razonable, la primera hipótesis y refutó la segunda. Además, lo hizo de manera aislada y no global, ya que cada una de estas hipótesis se puso a prueba por sí misma y de manera directa. Duhem no cuestionaría esta conclusión ya que se trata de dos hipótesis que tienen contenido empírico por sí mismas y, por tanto, no están, según admite el propio Duhem, sujetas a las consecuencias del holismo epistemológico.

Las hipótesis corpuscular y ondulatoria acerca de la naturaleza de la luz, en cambio, son de carácter teórico y no tienen contenido empírico por sí mismas, por lo que, a diferencia de las dos anteriores, no se pueden contrastar por medio de ningún experimento. Ninguna de las dos implica por sí misma alguna de las hipótesis empíricas acerca de la velocidad que la luz tiene en el agua. Para deducir una de las dos hipótesis contrastables ($v = c/n$ o $v = c.n$) es necesario apelar a otras hipótesis teóricas. Por ejemplo, las hipótesis del frente de onda y de la dispersión de las ondas al entrar en un medio más denso en la teoría ondulatoria, o la hipótesis sobre la fuerza de gravedad en la teoría corpuscular. Esta última es una hipótesis que puede considerarse externa a la teoría de la emisión de la luz, perteneciente a una teoría presupuesta, como la de la gravitación universal. La hipótesis del éter luminífero, en cambio, es indudablemente interna a la teoría ondulatoria. Así, la confirmación experimental de la teoría ondulatoria es global y no puede atribuirse a la hipótesis aislada según la cual la luz es una onda. Lo mismo puede decirse de la refutación de la teoría corpuscular, de la cual no se infiere que la hipótesis de que la luz se compone de partículas sea falsa. En este punto en particular, debe admitirse que Duhem tenía razón y que Arago estaba equivocado. Sin embargo, no se sigue de allí que el experimento de Fizeau y Foucault no provea una evidencia crucial a favor de una teoría globalmente considerada (incluyendo en el sistema teórico que se pone a prueba a las hipótesis auxiliares y a las teorías presupuestas) y en contra de la teoría rival. Claramente, el experimento confirmó la teoría ondulatoria y disconfirmó la teoría corpuscular, aunque no verificó la hipótesis ondulatoria por sí misma, ni falsó la hipótesis corpuscular por sí misma.

Duhem terminó su crítica del experimento crucial señalando que la refutación (global, por cierto) de la teoría de la emisión no implica la verificación de la teoría ondulatoria (Duhem, 1906, pp. 288-289). Esto es cierto por el simple hecho de que las teorías corpuscular y ondulatoria de la luz no son contradictorias (ya que podrían ser ambas falsas, mientras que una tercera teoría rival, todavía no concebida, podría ser verdadera). No obstante, este hecho no invalida la experiencia crucial en cuanto proveedora de evidencia confirmatoria para una de las teorías rivales y refutatoria para la otra.

Duhem no distinguió claramente entre la verificación y la confirmación de una teoría. Para nosotros, y desde hace muchas décadas, es obvio que ningún experimento, sea crucial o no, es capaz de proveer evidencia suficiente como verificar una teoría, en particular, una que contiene leyes generales. Y ello es así por razones lógicas que los partidarios del método hipotético-deductivo conocían ya desde mediados del siglo XIX. Sin embargo, no se sigue de allí que las teorías no puedan ser confirmadas (o corroboradas) por la evidencia que implican. Me parece indudable, entonces, que el experimento de Fizeau y Foucault proporciona una evidencia crucial en el sentido de que una y la misma evidencia confirma globalmente un sistema de hipótesis teóricas, que contiene a la teoría ondulatoria de la luz, y disconfirma global-

mente a un sistema rival de hipótesis teóricas, que contiene a la teoría corpuscular de la luz. No encuentro ninguna razón convincente entre los argumentos de Duhem para no aceptar este resultado. Tampoco advierto ninguna razón para no llamar crucial a este experimento, si se entiende que es crucial entre dos sistemas de hipótesis incompatibles entre sí.

En 1850 Fizeau y Foucault consideraron que el resultado experimental que habían obtenido impactaba sobre las teorías de la luz como un todo, confirmando la teoría ondulatoria y refutando la teoría corpuscular, y, al mismo tiempo, señalaron que, cualquiera hubiera sido el resultado de sus experimentos, la refutación de alguna de las dos teorías rivales podría evitarse modificando otras hipótesis de cada sistema teórico y reteniendo, a la vez, las hipótesis fundamentales sobre la composición corpuscular u ondulatoria de la luz. La interpretación de Fizeau y Foucault está, pues, en consonancia con el holismo epistemológico de Duhem, aunque éste no lo haya advertido. No obstante, ambos físicos, y toda la comunidad científica de su tiempo, no dejaron de considerar que el experimento que habían realizado era crucial.

7. La descarga teórica de la experimentación

Un resultado experimental es siempre un producto bastante complejo, muy diferente de los datos crudos que se obtienen del uso de un instrumento de medición. Ante todo, los datos son tratados estadísticamente, obteniéndose la media del valor medido, la desviación estándar y otros productos del análisis estadístico. Luego, generalmente se elabora un modelo de los datos, que es el que se utilizará como evidencia para contrastar las hipótesis o teorías puestas a prueba. Finalmente, el resultado experimental se interpreta teóricamente a la luz del conocimiento vigente, empleándose para ello un amplio conjunto de hipótesis auxiliares y teorías presueltas. Este resultado está teóricamente cargado ya que depende de todo un contexto teórico y, consiguientemente, su significado puede cambiar cuando este contexto sufre modificaciones más o menos drásticas. Sin embargo, el mismo resultado experimental también puede ser descargado de teorías, de modo tal que sea susceptible de ser descrito sin presuponer la mayor parte del contexto teórico en el que fue originalmente interpretado. Este resultado descargado de teoría puede, entonces, ser reinterpretado en otro contexto teórico, por ejemplo, uno posterior que incluya nuevas teorías, contexto en el cual adquiere un significado completamente diferente. Así, un experimento que se consideraba confirmatorio de una teoría, luego puede considerarse confirmatorio de otra teoría diferente. Igualmente, un experimento que en un momento dado se consideraba crucial entre dos teorías determinadas, después puede considerarse crucial entre otras dos teorías diferentes, no necesariamente novedosas.

Consideremos nuevamente el experimento de Fizeau y Foucault de 1850. En ese momento se lo interpretó como una confirmación indudable de la teoría ondulatoria de la luz, que incluía, entre otras, la hipótesis de la existencia del éter luminífero. Esa hipótesis hace tiempo que ha sido abandonada y el resultado experimental ahora se explica de una manera muy diferente en el contexto de la teoría cuántica de la luz.²⁷ Sin embargo, para poder ser explicado en un marco cuántico, primero tiene que ser descargado de las hipótesis teóricas propias de la teoría ondulatoria clásica, entre ellas, la del éter luminífero. Esta descarga teórica era posible incluso en 1850, ya que el resultado del experimento podía describirse en términos neutrales respecto de las teorías corpuscular y ondulatoria de la luz. Sin duda, no es posible descargar completamente una observación o resultado experimental de todo concepto, incluso de todo concepto teórico, ya que resultaría difícilmente inteligible; pero sí es posible alcanzar un nivel suficientemente bajo de carga teórica como para que dicho resultado pueda suscitar el acuerdo de los partidarios de cualquiera de las teorías rivales en disputa en un momento dado.

En nuestro caso de análisis, el resultado del experimento puede describirse diciendo que las velocidades de la luz en el aire y en el agua son (aproximadamente) iguales a c/n_1 y c/n_2 (donde n_1 y n_2 son, respectivamente, los índices de refracción del aire y del agua). Esta descripción sólo presupone el acuerdo sobre el valor de la velocidad la luz en el vacío c y sobre los valores de los coeficientes de refracción del agua y del aire, cuya medición es independiente del experimento de Fizeau y Foucault. El valor de la velocidad de la luz en el vacío, por otra parte, aunque todavía era mal conocido en esa época, también es el producto de mediciones independientes de dicho experimento (en este caso, las que realizó el propio Fizeau en 1849). Todos estos presupuestos podían aceptarlos los partidarios de las teorías corpuscular y ondulatoria de la luz, sobre la base de teorías compartidas, como la mecánica y la óptica geométrica.

El resultado del experimento de Fizeau y Foucault puede descargarse aún más de teoría, describiéndolo sin emplear ningún concepto de la óptica, afirmando que la velocidad de la luz en el aire es (aproximadamente) igual a c , mientras que su velocidad en el agua es (aproximadamente) igual a $\frac{3}{4}c$. Se lo puede formular incluso en términos comparativos, diciendo simplemente que la velocidad de la luz en el agua es menor que su velocidad en el aire. Esta última descripción sólo presupone el concepto cinemático de velocidad y tiene tan poca carga teórica que sería aceptable para cualquier físico, tanto en el siglo XIX como en la actualidad. No obstante, proporciona una evidencia suficiente como para confirmar a la teoría ondulatoria de la luz y disconfirmar a la teoría corpuscular.

²⁷ La hipótesis del éter luminífero persistió, pese a toda la evidencia experimental negativa, hasta la década de 1930. Véase al respecto la detallada obra de Swenson (1972).

Una vez descargados de teoría, los resultados experimentales son sumamente estables frente al cambio teórico. Si generalizamos el resultado del experimento de Fizeau y de Foucault diciendo que confirmó la hipótesis según la cual la velocidad de la luz en los medios transparentes en reposo respecto del observador es $w = c/n$, nos encontramos con una regularidad empírica²⁸ que es independiente de la teoría ondulatoria de la luz y que cualquier teoría óptica posterior debería explicar, o al menos, acomodar.

Para reinterpretar un experimento no es necesario repetirlo en ningún respecto; basta con reconceptualizarlo. En la teoría cuántica de la luz, por ejemplo, la radiación electromagnética se concibe como compuesta por fotones, partículas de masa en reposo nula dotados de energía cinética $E = hn$ y momento lineal $p = hn/c$ (donde n es la frecuencia de la luz y h es la constante de Planck), que se mueven siempre en el vacío con la velocidad invariante c . La propagación de la luz en un medio material debe entenderse, entonces, como una sucesión de procesos de absorción y emisión de los fotones por parte de los electrones de los átomos de la materia, proceso en el cual cada fotón resulta aniquilado al ser absorbido, mientras que un nuevo fotón resulta creado en el momento de su emisión. En este marco conceptual, el hecho de que la velocidad de la luz en el agua sea c/n no puede interpretarse como una desaceleración de los fotones, que es incompatible con la teoría de relatividad especial, sino que deberá entenderse como el producto de un retardo entre la absorción y emisión de los fotones por parte de los electrones de las moléculas de agua. La disminución de la velocidad de la luz en un medio material es, pues, un fenómeno macroscópico, que no ocurre en el nivel de las partículas elementales. Los fotones que atraviesan el agua no se mueven en un medio continuo, sino exclusivamente en el espacio vacío entre los electrones, viviendo solamente una fracción muy pequeña de tiempo. Sin embargo, aunque la explicación de la desaceleración de la luz cuando pasa del aire al agua sea en la teoría cuántica muy diferente de la de la teoría ondulatoria clásica, el hecho corroborado por Fizeau y Foucault de que la velocidad de la luz disminuye en proporción inversa al índice de refracción del agua se mantuvo estable hasta nuestros días. Es un hecho establecido que difícilmente vaya a cambiar en el futuro, aunque la explicación actualmente aceptada sea reemplazada por otra completamente diferente.

²⁸ Una “ley experimental”, en términos de Duhem. Nagel (1961) pp. 86-87, argumentó explícitamente que tales leyes experimentales tenían “una vida propia”, independiente de las teorías que pudieran explicarlas. Los dos experimentos que he analizado confirman la idea de Nagel, que se anticipó en más de dos décadas a Hacking (1983) y otros filósofos de la experimentación.

8. Las condiciones de un experimento crucial

Cualquier experimento que permita contrastar exitosamente una teoría está sujeto a diversas condiciones que hacen posible llevar a cabo dicha contrastación. Los experimentos cruciales, para ser posibles, deben cumplir, además, algunos requisitos adicionales. En todo experimento es necesario fijar el conocimiento antecedente que se emplea para deducir las predicciones que se han de poner a prueba. A este trasfondo pertenecen las hipótesis auxiliares y las teorías presupuestas. Si no hay acuerdo en la comunidad científica sobre la aceptabilidad de este conocimiento antecedente, no se podrá admitir la predicción derivada y, por consiguiente, el experimento no podrá proseguirse. En un experimento crucial se requiere, además, que los partidarios de las teorías rivales en disputa admitan la existencia de predicciones cruciales y acuerden en la corrección de las respectivas deducciones.

En cualquier experimento es necesario que se llegue a una decisión acerca de si los resultados experimentales verifican o refutan una determinada predicción, es decir, debe llegarse a un acuerdo acerca de si todas las condiciones C se han verificado y si el enunciado e_1 se ha verificado o refutado (o sea, si el evento en cuestión ha ocurrido o no). Si no hay acuerdo acerca de estos hechos básicos, el resultado experimental no puede emplearse como evidencia contrastadora. En un experimento crucial se requiere que simultáneamente se admita que e_1 se ha verificado y e_2 se ha refutado, o bien que e_2 se ha verificado y e_1 se ha refutado. Esto es, el experimento crucial necesita que una de las predicciones cruciales sea falsada y la otra verificada.

En todo experimento se requiere que la descripción del resultado experimental se realice en términos que no presupongan la verdad de la teoría que se quiere contrastar; de otro modo, la contrastación resultaría viciosamente circular. En un experimento crucial es indispensable que la descripción del resultado experimental se realice en términos neutrales respecto de la verdad o falsedad de las teorías rivales que se quieren contrastar.

La descripción de un resultado experimental, para que éste sea reconocido por la comunidad científica correspondiente, debe hacerse mediante conceptos y teorías vigentes en el momento en que se lo realiza; de otra manera, no podrá ser admitido como un resultado legítimo. En un experimento crucial se requiere, además, que la descripción de los resultados experimentales se haga en términos de conceptos y teorías compartidos por los partidarios de las diferentes teorías rivales. No es necesario que los términos tengan exactamente el mismo sentido, sino que éstos sean conmensurables sobre una base común de significado. Si los términos son inconmensurables, entonces, no hay experimento crucial posible, salvo en un sentido equívoco. Este requisito merece un comentario más detallado.

En el contexto de las teorías corpuscular y ondulatoria de la luz, el concepto de velocidad de la luz no tiene exactamente el mismo significado cuando se aplica a las entidades inobservables que componen un rayo luminoso. La velocidad de una onda es conceptualmente diferente de la velocidad de un corpúsculo. En las ondas pueden distinguirse la velocidad de fase y la velocidad de grupo, una distinción que no tiene sentido aplicar a las partículas materiales. De hecho, las velocidades de fase y de grupo de una onda coinciden en el vacío, pero difieren en los medios dispersivos como el agua, donde la velocidad de fase depende de la frecuencia (o la longitud de onda) de la luz que atraviesa el medio. Si bien el experimento de Fizeau despreciaba la dispersión producida por el agua, ya que no tenía sensibilidad suficiente para detectar las diferencias en las velocidades de rayos de diferente frecuencia, esto no anulaba la distinción conceptual entre las dos clases de velocidades. En sentido estricto, cualquier experimento diseñado sobre la base de la teoría ondulatoria mide sólo la velocidad de grupo de la luz. No obstante, el concepto de velocidad de la luz no resulta inconmensurable cuando se aplica a un rayo de luz macroscópico. En ese caso, los partidarios de las dos teorías rivales coinciden en el significado del concepto de velocidad de un rayo determinado, que es observable. Esto es suficiente a los fines del experimento, ya que nunca se observa en éste ni ondas ni corpúsculos luminosos individuales, sino sólo el fenómeno colectivo macroscópico que conforma el rayo de luz. La descripción del resultado experimental no requiere que se asuma una teoría determinada de la estructura microscópica de los rayos que se observan. Por esa razón, los partidarios de las teorías corpuscular y ondulatoria pueden admitir la misma descripción del resultado experimental de Fizeau y Foucault en términos de velocidades de entidades observables como los rayos de luz.

Los conceptos científicos efectivamente cambian de significado, a menudo de manera más o menos gradual. Por esa razón, los conceptos que se emplean en teorías muy alejadas en el tiempo pueden tener un carácter inconmensurable. Un experimento crucial requiere la conmensurabilidad de los conceptos empleados en la formulación de las predicciones cruciales y en la descripción de los resultados experimentales. Por ello, tales experimentos son generalmente posibles entre teorías rivales contemporáneas entre sí, pero difícilmente entre teorías vigentes en épocas muy diferentes. Resultaría muy improbable concebir un experimento crucial entre, por ejemplo, la teoría aristotélica del movimiento y la mecánica relativista, ya que la distancia conceptual entre ambas teorías es demasiado grande y los conceptos empleados en ellas, incluso el de movimiento, resultan inconmensurables entre sí.

Por último, un experimento crucial no presupone que los partidarios de las teorías rivales compartan el mismo conjunto de hipótesis auxiliares ni de teorías presupuestas. La derivación de las respectivas predicciones cruciales puede hacerse, y generalmente se hace, a partir de presupuestos muy diferentes que casi nunca se conocen con certeza y, a menudo, no se conocen en su totalidad. En última instan-

cia, las hipótesis auxiliares y las teorías presupuestas, aunque fueran compartidas, podrían ser todas ellas falsas.

9. Experimentos cruciales y experimentos decisivos

Existe un uso de la expresión “experimento crucial”, un uso especialmente difundido en la lengua inglesa, según el cual los experimentos cruciales son aquellos que constituyen un punto de inflexión en la aceptación o el rechazo de una teoría por parte de una determinada comunidad científica. Los experimentos cruciales serían, entonces, aquellos que proporcionan una evidencia lo suficientemente importante como para decidir la aceptación o el rechazo de una teoría, por más que desde un punto de vista lógico no verifiquen ni refuten dicha teoría.²⁹ Este concepto de experimento crucial es completamente independiente del que he caracterizado más arriba. Un experimento que contrasta simultáneamente dos teorías rivales no tiene por qué producir una evidencia decisiva para la aceptación o rechazo de alguna de tales teorías. A su vez, un experimento que proporciona dicha clase de evidencia no tiene por qué ser crucial, es decir, no necesita contrastar teorías rivales. Dado que se trata de dos conceptos independientes, resulta equívoco emplear el mismo nombre para designarlos. De hecho, se los confunde con frecuencia.³⁰ Es conveniente llamar *experimentos decisivos* a aquellos que proporcionan evidencia considerada suficiente para la aceptación o el rechazo de una teoría y mantener el nombre de *experimentos cruciales* para aquellos que proporcionan evidencia contrastadora para dos o más teorías rivales. Naturalmente, ambos conceptos son compatibles y un mismo experimento podría ser a la vez crucial y decisivo. Aquí, sin embargo, sólo me he ocupado de los experimentos cruciales en el sentido débil del término que he definido antes, y no me pronunciaré sobre la cuestión de si existen en la ciencia experimentos decisivos.

La confusión entre experimentos cruciales y experimentos decisivos ha sido fomentada por la propia caracterización de los experimentos cruciales que han hecho los filósofos de la ciencia. A menudo se los caracteriza como experimentos que permiten “decidir” o “tomar una decisión” entre teorías rivales, esto es, aceptar

²⁹ Es, por ejemplo, la manera en que Lakatos (1974) emplea el término experimento crucial.

³⁰ En 1873 Jevons advirtió en su obra *The Principles of Science* contra la confusión entre experimento crucial y experimento importante o decisivo:

No creo, en verdad, que el uso común de la palabra <crucial> concuerde en absoluto con el pretendido por Bacon. [...] El experimento de Pascal que llevó un barómetro a la cima del Puy-de Dôme a menudo ha sido considerado como un perfecto *experimentum crucis*, si no incluso como el primero registrado (Herschel, 1830, p. 219); pero si ello es así, deberíamos dignificar la doctrina del horror al vacío de la naturaleza con el rango de una teoría rival. Un experimento crucial no debe simplemente confirmar una teoría, sino que debe ser negativo para otra. (Jevons, 1873, p. 519).

una y rechazar la otra. El propio Popper empleó este modo de expresión.³¹ Pero, en mi opinión, se trata de un equívoco. La falsación o refutación de una teoría no implica que ésta sea rechazada por los usuarios de dicha teoría. La falsación es una relación puramente lógica entre proposiciones de la cual nada se sigue acerca del rechazo o abandono de la teoría falsada, que es una actitud práctica respecto de tal teoría. En todo caso, la falsación puede constituir una razón, entre otras posibles, para abandonar una teoría. El rechazo y la aceptación de teorías son actitudes pragmáticas que no están determinadas solamente por la adecuación empírica (o falta de ella) de las teorías, sino por un conjunto bastante complejo de razones y criterios, tanto factuales como no factuales.

Es un hecho comprobable en la historia de la ciencia que hay teorías que en un momento determinado se consideraron falsadas por la evidencia disponible y, sin embargo, no fueron abandonadas. Ello también ocurre en la ciencia actual. La mecánica de Descartes y la mecánica de Newton deben considerarse falsadas a la luz de la relatividad especial, que es una teoría que las ha superado a ambas. Sin embargo, la mecánica newtoniana, a diferencia de la cartesiana, no ha sido rechazada.³² Se la enseña de manera universal en los cursos de física y se la aplica en todos los aspectos de la ingeniería. Proporciona una aproximación razonablemente precisa a los resultados experimentales cuando se la emplea para predecir fenómenos en los cuales las velocidades de los cuerpos involucrados son bajas respecto de la velocidad de la luz en el vacío. No obstante, en sentido estricto, las fórmulas relativistas no dan nunca el mismo resultado que las newtonianas, salvo en el caso límite en que la velocidad de una partícula o cuerpo es exactamente igual a cero.³³ Para el dominio de las altas velocidades, la mecánica newtoniana predice resultados claramente falsos. Así, la medición del momento lineal de una partícula subatómica que se mueve en un acelerador de partículas a una velocidad de $0.99c$ confirma la fórmula relativista ($p = m \cdot v / \sqrt{1 - v^2/c^2}$) con gran precisión y refuta de manera inequívoca (sobre la base de un amplio conocimiento antecedente, por cierto) la fórmula newtoniana ($p = m \cdot v$). Por ejemplo, para el caso de un protón (cuya masa es de $938,27 \text{ MeV}/c^2$) que se mueve con una velocidad de $0,99c$ el momento lineal newtoniano (considerando $c = 300.000 \text{ km/s}$) es igual a $928,88 \text{ MeV}/c$; mientras que el momento relativista es igual a $6569,21 \text{ MeV}/c$. Si, en cambio, el protón se mueve con velocidad $0,01c$, el momento newtoniano es de $9,3827 \text{ MeV}/c$ y el relativista es de $9,3831 \text{ MeV}/c$. A la velocidad de $0,99c$ el momento relativista es 7 veces mayor

³¹ Véase el pasaje citado en la nota 4.

³² La mecánica cartesiana fue gradualmente abandonada durante el siglo XVIII, cuando la mecánica newtoniana se impuso en Europa continental.

³³ Más precisamente, algunas fórmulas de la mecánica relativista se reducen a las de la mecánica newtoniana cuando $\beta^2 \rightarrow 0$ (donde el parámetro $\beta = v/c$). Otras ecuaciones de la relatividad especial, como $E_0 = m \cdot c^2$, no tienen análogo en la mecánica newtoniana.

que el momento newtoniano, mientras que a $0,01c$ (una velocidad sumamente alta para cuerpos macroscópicos sobre la Tierra) es sólo 4 diez milésimas mayor. Para velocidades del orden de los cientos o los miles de kilómetros por hora, la diferencia entre ambos momentos es completamente despreciable y la fórmula newtoniana proporciona valores exactos para todo fin práctico.³⁴

Un experimento de medición del momento lineal de un protón acelerado a la velocidad $0,99c$, que hoy puede realizarse de manera rutinaria, resulta crucial entre las dos teorías: refuta a la mecánica newtoniana y confirma a la relativista; sin embargo, no ha sido decisivo, en el sentido de que no ha producido el rechazo de la mecánica newtoniana. En todo caso, se ha restringido el dominio de aplicación de esta teoría, fuera del llamado dominio relativista. Para la dinámica de los objetos macroscópicos sobre la Tierra, la mecánica newtoniana funciona perfectamente bien, dentro de los límites del error observacional, y, además, su aplicación resulta mucho más simple, económica y conveniente que la mecánica relativista (como puede advertirse comparando las dos fórmulas para el momento lineal).

Este ejemplo muestra claramente que un experimento puede ser crucial y, sin embargo, no ser decisivo y, por tanto, no llevar al rechazo de la teoría que se considera refutada por dicho experimento. En general, una teoría que se admite como falsa no será rechazada mientras sea útil para fines prácticos y proporcione una aproximación razonable a los resultados experimentales dentro de un determinado dominio de fenómenos más o menos bien acotado. Con más razón se la retendrá si la aplicación de dicha teoría es más simple que la de la teoría que la ha superado. Ello es así aunque la teoría refutada no se conserve como caso límite de la teoría confirmada por las experiencias cruciales (como ocurre con la mecánica newtoniana, que se recupera como caso límite de la relatividad especial).³⁵

10. Conclusiones

Frecuentemente se cita, con cierta ligereza, el *dictum* de Duhem según el cual “el experimento crucial es imposible en física” (Duhem, 1906, p. 285). En cambio, nadie diría razonablemente que los experimentos en general no son posibles en la ciencia. Sin embargo, todas las razones que Duhem y otros holistas epistemológicos invocan para negar la existencia de experimentos cruciales también se aplican a cualquier experimento no crucial. En cualquier experimento destinado a contrastar una teoría se emplean predicciones deducidas de un conjunto muy amplio de hipótesis teóricas, conjunto que incluye usualmente una diversidad de hipótesis

³⁴ La mecánica cartesiana, en cambio, no permite aproximar los resultados newtonianos ni, por tanto, los relativistas.

³⁵ En las condiciones, y con las reservas, señaladas en la nota 33.

auxiliares y teorías presupuestas. El resultado de un experimento exitoso confirma o disconfirma todo un sistema de hipótesis. Cualquier resultado experimental se interpreta en el contexto de un amplio sistema de hipótesis y teorías admitidas, esto es, cualquier experimento está cargado de teoría. Todo experimento, además, proporciona un resultado que puede ser descargado de teoría y que se vuelve (relativamente) estable frente al cambio teórico. Finalmente, todo resultado experimental puede ser reinterpretado en un nuevo contexto teórico en el que adquiere un significado completamente diferente del que tenía en el contexto en el cual fue originalmente realizado. Todo esto es común a cualquier experimento en general. Un experimento que en un momento se interpretaba como confirmatorio de una teoría dada puede interpretarse en el futuro como confirmatorio de una teoría diferente e incompatible con ella. Es posible incluso que un experimento que se consideraba crucial entre dos teorías rivales en un momento posterior se considere crucial entre dos teorías diferentes.³⁵ Todos los resultados experimentales están siempre abiertos a diferentes interpretaciones teóricas y a explicaciones alternativas.

Así, aun admitiendo un holismo epistemológico moderado (que no implique que en cada experimento se contrasta la totalidad de nuestro conocimiento), con la consiguiente concepción deductivista de la contrastación que éste presupone, los experimentos cruciales resultan perfectamente posibles. Incluso el simple hecho de encontrar un par de predicciones cruciales es ya un descubrimiento importante, porque muestra que las teorías rivales en cuestión no son empíricamente equivalentes, aunque en la práctica el experimento crucial entre ellas no sea posible.

Es indudable que un experimento crucial sólo es posible sobre la base de un conjunto amplio de hipótesis auxiliares y teorías presupuestas que fijan el marco teórico dentro del cual se interpreta dicho experimento. Pero esto vale en general para cualquier experimento cuyo resultado haya de utilizarse como evidencia a favor o en contra de una determinada teoría o hipótesis. Si no hubiera un marco teórico fijado, que no se considera en juego en el momento en que sea realiza un determinado experimento, es decir, que se pone fuera del proceso de contrastación (al menos en primera instancia), ningún experimento sería posible. Sin un trasfondo de

³⁵ Esto ocurrió de hecho con otro experimento de Fizeau, realizado en 1851, donde midió, relativamente al laboratorio, la velocidad de la luz en agua corriente (Fizeau, 1851 y 1859). En su momento el resultado obtenido se interpretó como la confirmación de la hipótesis de Fresnel del arrastre parcial del éter por el agua en movimiento. Esta explicación tenía serios problemas conceptuales porque hacía depender el arrastre del éter de la frecuencia de la luz incidente en el agua (véase Stachel, 2005 y las referencias allí citadas). En 1907 Von Laue probó que el coeficiente de arrastre de Fresnel podía deducirse, como una aproximación a primer orden en v/c , de la transformación relativista de las velocidades. De esta manera se proporcionaba una explicación puramente cinemática del resultado del experimento de Fizeau, considerado como un caso de composición relativista de velocidades. A partir de 1910 Einstein sostuvo de manera explícita que el experimento de Fizeau era crucial entre las transformaciones relativista y galileana de las velocidades (Einstein, 1910, pp. 6-7).

conocimiento que se supone provisoriamente no problemático no habría posibilidad de experimentación, ya que no sería posible interpretar, y a veces ni siquiera describir, el propio resultado experimental.

También es indudable que todo marco teórico, dentro del cual se interpreta un experimento dado, está sujeto al cambio, al menos a largo plazo. Ningún contexto teórico se puede fijar de manera permanente y, por esa razón, ninguna interpretación de un resultado experimental es definitiva. Un experimento es crucial sólo respecto de dos o más teorías rivales vigentes en un momento determinado y respecto del conocimiento aceptado en ese momento. El experimento crucial permite concluir que una determinada teoría o sistema de hipótesis es empíricamente adecuado y que otros sistemas rivales no lo son. La adecuación empírica de una teoría, por cierto, es relativa a un momento dado, ya que en un sentido absoluto es tan incognoscible como la verdad.

Los experimentos cruciales no son “cruciales en retrospectiva”, sino casi siempre en el momento mismo en que se los realiza. Generalmente, los experimentos cruciales influyen de manera significativa en el curso del desarrollo futuro de las teorías. Inciden, a veces de manera decisiva, en la aceptación de la teoría que resultó confirmada y promueven la revisión, y en ocasiones el abandono, de la teoría rival que fue disconfirmada. Los científicos, cuando se encuentran ante teorías rivales igualmente bien confirmadas, siempre buscan imaginar un experimento crucial entre ellas, aunque no siempre lo consideran como una razón suficiente para abandonar alguna de tales teorías.

Podría objetarse que esta es una concepción demasiado débil de los experimentos cruciales, que no hace justicia al concepto original, baconiano, de esta clase de experimentos. Pero esta no sería una objeción razonable en nuestra época, cuando el alcance epistemológico de toda experimentación ha sido completamente reevaluado. Hace ya mucho tiempo que los filósofos de la ciencia han aceptado que ningún experimento, desde un punto de vista estrictamente lógico, es capaz de verificar o refutar una teoría de manera concluyente. ¿Por qué la situación debería ser diferente con los experimentos cruciales? La evidencia proporcionada por un experimento crucial, como la de cualquier otro experimento, sólo puede pretender confirmar o disconfirmar una teoría o sistema de hipótesis dentro de un contexto teórico específicamente fijado, pero siempre susceptible de revisión. Eso es lo más que puede esperarse de un resultado experimental en general.

Referencias bibliográficas

ARAGO, F. (1810) “Mémoire sur la vitesse de la lumière, lu à première classe de l’Institut, le 10 décembre 1810”, *Compte Rendue des Séances de l’Académie des Sciences (Paris)*, 36, (1853) pp. 38-49.

- ARAGO, F. (1838): “Sur un système d’expériences à l’aide duquel la théorie de l’émission et celle des ondes seront soumises à des épreuves décisives”, *Compte Rendue des Séances de l’Académie des Sciences (Paris)*, 23, pp. 954-965.
- ARAGO, F. (1850): “Note sur le système d’expériences, proposé en 1838, pour prononcer définitivement entre la théorie des ondes et la théorie de l’émission”, *Compte Rendue des Séances de l’Académie des Sciences (Paris)*, 30, pp. 489-495.
- ARIEW, R. (1984): “The Duhem Thesis”, *British Journal for the Philosophy of Science*, 35, pp. 313-325
- BACON, F. (1620): *Novum Organum*, Translated and edited by P. Urbach and J. Gibson, Chicago, Open Court, 1994.
- BALASHOV, Y. (1994): “Duhem, Quine, and the Multiplicity of Scientific Tests”, *Philosophy of Science*, 61, pp. 608-628.
- BRADLEY, J. (1728): “An Account of a New Discovered Motion of the Fixed Stars”, *Philosophical Transactions of the Royal Society (London)*, 35, pp. 637-661.
- CASSINI (2003): “Confirmación hipotético-deductiva y confirmación bayesiana”, *Análisis Filosófico*, 23, pp. 43-84.
- DORLING, J. (1979): “Bayesian Personalism, the Methodology of Scientific Research Programmes, and Duhem’s Problem”, *Studies in History and Philosophy of Science*, 10, pp. 177-187.
- DUHEM, P. (1894): “Quelques réflexions au sujet de la physique expérimentale”, *Revue des questions scientifiques*, 36, pp. 179-229.
- DUHEM, P. (1906): *La théorie physique: Son objet, sa structure*, Paris, Chevalier et Rivière. Deuxième édition 1914. [Reimpreso en Paris, Vrin, 1981].
- EINSTEIN, A. (1910): “Le principe de relativité et ses conséquences dans la physique moderne”, *Archives des sciences physiques et naturelles*, 29, pp. 5-28; 125-144.
- FETZER, J. H. & ALMEDER, R. F. (1993): *Glossary of Epistemology / Philosophy of Science*, New York, Paragon House.
- FIZEAU, A. (1849): “Sur une expérience relative à la vitesse de de propagation de la lumière”, *Comptes Rendus des Séances de l’Académie des Sciences (Paris)*, 29, pp. 90-92.
- FIZEAU, A. (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 (Paris)*, 33, pp. 349-355.
- FIZEAU, A. (1859): “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”, *Annales de Chimie et de Physique. Troisième Série*, 57, pp. 385-404.

- 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 (Paris)*, 30, pp. 771-774.
- FOUCAULT, L. (1850): “Méthode gènèrale 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 (Paris)*, 30, pp. 551-560.
- FOUCAULT, L. (1854): “Sur les vitesses relatives de la lumière dans l’air et dans l’eau”. *Annales de Chimie et de Physique. Troisième Série*, 41, pp. 129-164.
- FRESNEL, A. (1816): “Sur la diffraction de la lumière”, *Annales de Chimie et de Physique*, 2, pp. 239-281.
- FRESNEL, A. (1818): “Lettre d’ Augustin Fresnel a François Arago sur l’influence du mouvement terrestre dans quelques phénomènes d’optique”, *Annales de Chimie et de Physique*, 9, pp. 57-76.
- GILLIES, D. (1993): *Philosophy of Science in the Twentieth Century: Four Central Themes*, Oxford, Blackwell.
- HACKING, I. (1983): *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Science*, Cambridge, Cambridge University Press.
- HARDING, S. (ed.) (1976): *Can Theories be Refuted ? Essays on the Duhem-Quine Thesis*, Dordrecht, Reidel.
- HOOKE, R. (1665): *Micrographia*, New York, Dover, 1951.
- HUYGENS, C. (1690): *Traité de la lumière*, Paris, Gauthier-Villars, 1920.
- JEVONS, W. S. (1873): *The Principles of Science: A Treatise on Logic and Scientific Method*, London, Macmillan.
- KLIMOVSKY, G. (1994): *Las desventuras del conocimiento científico. Una introducción a la epistemología*, Buenos Aires, A-Z Editora.
- LAKATOS, I. (1974): “The Role of Crucial Experiments in Science”, *Studies in the History and Philosophy of Science*, 4, pp. 309-325.
- LOHNE (1968): “Experimentum Crucis”, *Notes and Records of the Royal Society of London*, 23, pp. 169-199.
- NAGEL, E. (1961): *The Structure of Science: Problems in the Logic of Scientific Explanation*, New York, Harcourt, Brace & World.
- NEWTON, I. (1672): “New Theory about Light and Colours”, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 6, pp. 3075-3087, en H. W. Turnbull (ed), *The Correspondence of Isaac Newton. Vol. I. 1661-1675*, Cambridge, Cambridge University Press, 1959, pp. 92-102.
- NEWTON, I. (1704): *Opticks*, New York, Dover, 1979.
- POPPER, K. R. (1957): *The Poverty of Historicism*, London, Routledge, 2002.
- POPPER, K. R. (1959): *The Logic of Scientific Discovery*, London, Routledge, 1999. [Primera edición en alemán: 1934].

- POPPER, K. R. (1963): *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*, Fifth Revised Edition, London, Routledge, 1989.
- POPPER, K. R. (1983): *Realism and the Aim of Science*, London, Routledge, 1996.
- QUINE, W. V. O. (1951): “Two Dogmas of Empiricism”, *Philosophical Review*, 60, pp. 20-43.
- QUINE, W. V. O. (1975): “On Empirically Equivalent Systems of the World”, *Erkenntnis*, 9, pp. 313-328.
- QUINE, W. V. O. (1992): *Pursuit of Truth*, Revised Edition, Cambridge, Mass., Harvard University Press. [Primera edición: 1990].
- QUINE, W. V. O. & ULLIAN, J. S. (1978): *The Web of Belief*, Second Edition, New York, Random House. [Primera edición: 1970].
- RIVADULLA, A. (2004): *Éxito, razón y cambio en física. Un enfoque instrumental en teoría de la ciencia*, Madrid, Trotta.
- ROWBOTTOM, D. P. (2010): “Corroboration and Auxiliary Hypotheses: Duhem’s Thesis Revisited”, *Synthese*, 177, pp. 139-149.
- STACHEL, J. (2005): “Fresnel (Dragging) Coefficient as a Challenge to 19th Century Optics of Moving Bodies”, en Kox, A. J. y Eisenstaedt, J. (eds.) *The Universe of General Relativity*, Boston, Birkhäuser, 2005, pp. 1-13.
- SWENSON, L. S. (1972): *The Ethereal Aether: A History of the Michelson-Morley-Miller Aether-Drift Experiments, 1880-1930*, Austin, University of Texas Press.
- STREVENSON, M. (2001): “The Bayesian Treatment of Auxiliary Hypotheses”, *British Journal for the Philosophy of Science*, 52, pp. 515-537.
- VON LAUE, M. (1907): “Die Mitführung des Lichtes durch bewegte Körper nach dem Relativitätsprinzip”, *Annalen der Physik*, 23, pp. 989-990.
- WEBER, M. (2009): “The Crux of Crucial Experiments: Duhem’s Problems and Inference to the Best Explanation”, *British Journal for the Philosophy of Science*, 60, pp. 19-49.

Alejandro Cassini
Departamento de Filosofía
Universidad de Buenos Aires
defilo@filo.uba.ar