

ORIGEN, ASCENSO Y MUERTE DE LA HIPÓTESIS DEL ÉTER Y EL OJO CRÍTICO DE PAUL EHRENFEST

RICARDO GUZMÁN DÍAZ

JOSÉ ANTONIO CERVERA JIMÉNEZ

Instituto Tecnológico de Monterrey, Monterrey, México

RESUMEN

Paul Ehrenfest, físico nacido en Viena en 1880, reconocido dentro de su comunidad científica por su capacidad crítica, hizo un análisis de la crisis del éter lumínico en su conferencia inaugural de 1912, al asumir el puesto de profesor de física teórica en la Universidad de Leiden en sucesión de Lorentz. En este trabajo analizamos algunos de los aspectos en torno a la hipótesis del éter y su historia, haciéndolo desde la perspectiva de este brillante físico teórico, basándonos en la conferencia mencionada y en un artículo del mismo autor donde critica algunos de los puntos de vista de Einstein. En la búsqueda por dar una salida a dicha crisis, la lectura que Ehrenfest hace del tema nos permite recorrer algunas de las ideas de Lorentz, Ritz, Einstein y otros científicos en un momento histórico de cambios conceptuales que transformarían la imagen que tenemos del mundo. Adicionalmente, se analiza el resurgimiento, aunque con otras propiedades, del éter, siguiendo una conferencia de Einstein que, curiosamente, dictó en la misma Universidad de Leiden, invitado por Ehrenfest, en 1920.

ABSTRACT

Paul Ehrenfest, a physicist born in Vienna in 1880, whose critical abilities were very well recognized within his scientific community, carefully analyzed the crisis of the luminiferous aether in his inaugural conference in 1912, when assuming after Lorentz the position as professor of theoretical physics in the University of Leyden. In this article we analyze some features related to the aether hypothesis and its history, from the perspective of this brilliant theoretical physicist, based on the mentioned conference and an article of the same author where he criticizes some of Einstein's points of view. In the search for a resolution to the crisis, the readings that Ehrenfest makes of the theme allows us to follow some of the ideas of Lorentz, Ritz, Einstein and other scientists in a historical moment full of conceptual changes that transformed the physical image of the world. Besides that, we analyze the revival, although with different properties, of the aether, following a conference that Einstein himself pronounced in the same University of Leyden, invited by Ehrenfest, in 1920.

Palabras clave: Física, Éter, Ehrenfest, Einstein, Siglo XX, Siglo XIX.

Key words: Physics, Aether, Ehrenfest, Einstein, 20th Century, 19th Century.

1. Introducción

La ciencia, o mejor dicho, algunos de sus protagonistas, ocultan en ocasiones la verdadera identidad de esta actividad humana, presentándola como generadora de conocimiento totalmente objetivo, libre de intereses personales y basada únicamente en la experiencia y la razón. Esto ha conducido en buena medida a que la percepción pública de la empresa científica sea la de un proceso frío, calculado y que lleva a resultados inevitables, es decir, al *descubrimiento* de la realidad exterior. Sin embargo, como han mostrado los filósofos y sociólogos de la ciencia del último siglo, una disciplina dada puede tomar rumbos distintos, que dependen de múltiples factores, cuyas raíces se tienen que buscar en lo psicológico, lo social y lo cultural; aspectos que tienen que ver con gustos, creencias, motivaciones personales, etc. El mismo Albert Einstein (1879-1955) comprendía esto cabalmente y objetaba que otros científicos hablaran de los productos de su imaginación como si fueran «necesarios y naturales», que se pensara en ellos como «realidades dadas» y no como «creaciones del pensamiento»¹.

No hay tema que ejemplifique mejor el carácter imaginativo y contingente de las construcciones científicas que la idea del éter, especialmente en su desarrollo a lo largo del siglo XIX y principios del XX. William Thomson —lord Kelvin— (1824-1907), quien llegara a ser el científico inglés de mayor influencia a finales del periodo decimonónico, y quien trabajó incansablemente por conservar una imagen mecánica del mundo, llegó a decir sobre el éter que «su existencia es un hecho incuestionable»². Vale la pena observar el carácter tan definitivo de una declaración como ésta y recordar que varias décadas después aparecerían teorías que harían del éter un concepto del cuál se podría prescindir.

Nos dice Martín Klein que «se puede encontrar una puerta que nos lleve al pasado de las ciencias físicas en las conferencias inaugurales que los físicos han ofrecido al iniciar sus labores como profesores»³. Precisamente a principios del siglo XX, cuando la hipótesis del éter se encontraba en una encrucijada, Paul Ehrenfest (1880-1933) abordaba explícitamente el tema en su conferencia inaugural en la Universidad de Leiden⁴. George Gamow (1904-1968), quien conoció a Ehrenfest, lo describía como un miembro invaluable de la comunidad científica y se refería a él distinguiendo su conocimiento amplio y profundo de la física y, sobre todo, su aguda capacidad crítica en torno a los temas fundamentales de su disciplina⁵. Coincidimos con Gamow en esa apreciación y creemos que podemos aprender mucho de lo que dijo o escribió Ehrenfest. Por eso, nuestra intención en este artículo es abordar algunos aspectos en torno a la hipótesis del éter y su historia, haciéndolo desde la perspectiva de este brillante físico teórico a quien le tocó ser partícipe de los cambios fundamentales que sufrió, a principios del siglo XX, la imagen física que tenemos del mundo.

2. Planteamientos preliminares

2.1. Consideraciones y cuestionamientos desde la filosofía de la ciencia

Para este examen histórico sobre el éter, basado en la percepción personal que tenía Ehrenfest como científico a quien le tocó vivir en una época en la que confluían ideas que transformarían la física, consideramos pertinente exponer primero, de manera muy breve, algunos elementos que servirán como punto de apoyo, de comparación y de contexto para el análisis de la siguiente sección de este escrito.

Paul Ehrenfest poseía un gran talento para identificar los aspectos fundamentales y centrales de un tema, y sobre todo para plantear las preguntas cruciales⁶. En la sección tres veremos cómo aborda Ehrenfest, de manera puntual y penetrante, el tema del éter. Valdrá la pena que contrastemos sus cuestionamientos desde su perspectiva como físico, con algunos cuestionamientos relevantes planteados desde la filosofía de la ciencia. Por ejemplo, según Karl Popper (1902-1994), el criterio de demarcación entre ciencia y pseudociencia es la *falsabilidad*, es decir, una teoría científica es una teoría susceptible de ser demostrada como falsa⁷. ¿Es posible *falsar* la hipótesis del éter? Por otra parte, para Gerald Holton (nacido en 1941), además de las dimensiones fenoménicas y analíticas en torno a las cuales se justifica el conocimiento científico, existe un tercer mecanismo que entra en operación en el proceso de hechura de la ciencia, en la construcción de las teorías. Se trata de las presuposiciones fundamentales que guían a los científicos y que pueden ser personales o compartidas por un grupo. Holton les llama *themata* refiriéndose a «aquellos prejuicios de una índole estable y sumamente difundida que no son directamente resolubles ni derivables a partir de la observación y del raciocinio analítico»⁸. Con relación a nuestro tema central podemos preguntarnos si el concepto del éter entra dentro de esta categoría. Holton nos dice que en ocasiones los *themata* tienen su antítesis. ¿Cuál es la antítesis del éter? ¿Es el vacío? Éstas son algunas de las preguntas relevantes que surgen en torno a los temas planteados aquí.

2.2. Antecedentes históricos en la concepción del éter

Aunque podemos encontrar ideas sobre la constitución de un éter a lo largo de toda la historia, es en el siglo XIX cuando se constituye como una hipótesis central y fundamental para la física. Nuestro tema central que se desarrollará en la sección 3 se localiza en este siglo XIX y parte del XX, pero antes de eso vale la pena referirnos, aunque sea de manera muy breve, a lo ocurrido en tiempos anteriores para identificar contrastes, establecer comparaciones, etc.

¿Cómo vemos? Ésta es una pregunta que ya los antiguos se habían planteado. Según la concepción platónica, en el momento de la visión hay dos polos entre

los cuales se forja un eslabón, dos luces en realidad, una interior y una exterior —ahora diríamos del *observador* y lo *observado*— que dan lugar a la percepción. Esto nos habla de una preocupación sintética del yo en el mundo que después de la revolución científica se transformaría en una preocupación por el mundo físico exterior, o en otras palabras, «la vista se convierte en tema de la mecánica más que en la actividad espiritual tan característica de tantos pensadores anteriores»⁹. Desde la perspectiva de la ciencia moderna, ya no importa tanto la vivencia del fenómeno y lo que se busca es objetivar el mundo externo y teorizar sobre él.

Ya desde Aristóteles (384-322 a.n.e.) encontramos el *horror al vacío*, aunque en el sentido expresado en el párrafo anterior, como necesidad de una conexión entre el sujeto y el objeto. En su forma moderna, este concepto se clarifica con Descartes (1596-1650), para quien es inconcebible el espacio aparte de la materia. Para este filósofo francés, el espacio es un *plenum* capaz de transmitir y ejercer efectos en los cuerpos materiales inmersos en él¹⁰.

La historia del éter es a su vez la historia de la luz y de la óptica. Y esta historia sabemos que se caracteriza por la rivalidad entre quienes postulan teorías «emisionistas» y quienes postulan teorías «ondulatorias». Aunque ya Huygens (1629-1695) había sugerido la hipótesis de que la luz es una onda longitudinal que se propaga en un éter (de la misma forma que se propaga el sonido en el aire), Newton (1642-1727) rechazó esta idea y su teoría corpuscular prevaleció durante más de un siglo, hasta que la pugna resurgió a principios del siglo XIX con Young (1773-1829) y Fresnel (1788-1827), quienes se dieron cuenta de que la luz podía ser una onda transversal en vez de longitudinal, con lo cual prácticamente se abandonó el modelo de Newton. Aunque el propio Newton también utilizó la idea de un medio etéreo para poder explicar ciertos fenómenos, la necesidad del éter se hizo en realidad apremiante tiempo después, con las teorías ondulatorias y con la imagen de un mundo mecánico.

El siglo XIX fue heredero por un lado de la Ilustración y por otro del pensamiento romántico. En este contexto, este siglo se caracterizó por una filosofía positivista que le otorgaba a la ciencia la distinción de considerarla como la única portadora de un método para obtener conocimiento válido. Paradójicamente, se le atribuía a la ciencia ese poder por sustentarse supuestamente en un tipo de conocimiento basado en la percepción sensible y despreciar hipótesis que no tenían ese correlato sensorial; no deja de ser interesante que, en los hechos, los científicos del siglo XIX construyeron su visión de la realidad basándose en categorías sin un claro correlato sensorial, como los átomos, los campos, las acciones a distancia, y el éter.

En una conferencia que ofreció en el año de 1900, Ludwig Boltzmann (1844-1906) hablaba sobre la hegemonía que la mecánica, entendida como la ciencia del movimiento de los cuerpos, había conseguido sobre el resto de la física a lo largo del siglo XIX. A la mecánica se habían sometido la acústica y posteriormente la óptica, precisamente a raíz de que se considerara a la luz como fenómeno vibratorio. De ahí, nos dice Boltzmann, «se dejó enteramente a la fantasía la construcción de un medio capaz de oscilar, lo que presentó dificultades bastante grandes»¹¹.

Hay que recordar que el éter era importante para la física por la dificultad de aceptar la radiación luminosa en su versión ondulatoria sin un medio material en que se expresaran las vibraciones. Sin embargo, tras el famoso experimento de Michelson y Morley (1887), la no existencia del arrastre del éter provocó un problema para explicar la naturaleza ondulatoria de la luz. Einstein rechazó la existencia del éter cuando su hipótesis de la naturaleza corpuscular de la luz (1905) hizo innecesario que nada vibrara para que se transmitieran los campos electromagnéticos.

Algunas de las dificultades de la necesidad o no de la existencia del éter las aborda Ehrenfest en su conferencia de 1912, de la cual nos ocuparemos posteriormente.

3. La visión de Ehrenfest en torno al éter

Tratar de entender la ciencia, pero no en su construcción a posteriori, sino en su proceso de hechura, significa rescatar lo que en carne propia vivían los hombres y mujeres directamente involucrados, qué pensaban, cuáles eran sus herramientas de trabajo, cuáles eran sus expectativas en torno a su disciplina, como recibían las nuevas ideas de su comunidad científica, cómo aportaban ellos mismos sus conocimientos, etc. Por eso, como decíamos al principio de este artículo, es nuestra intención en este espacio introducirnos en la percepción que Paul Ehrenfest tenía sobre el tema del éter alrededor de los años 1911 y 1912 y con eso tener una imagen, a través de uno de los protagonistas del cambio científico, del estado de la crisis que prevalecía en esos tiempos.

Después de vivir por un tiempo en Rusia, de donde era originaria su esposa Tatiana (1876-1964), Paul Ehrenfest se incorporaba, en diciembre de 1912, como nuevo profesor de física teórica en la Universidad de Leiden, en sustitución del prestigioso físico Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928). Martín Klein, quien escribió la única biografía que se conoce de Ehrenfest¹², nos dice que la enseñanza era su verdadera vocación, que tenía el don para «enseñar de tal forma, que lograba poner a sus alumnos en contacto con los temas cruciales de la física lo

más pronto posible»¹³. En una carta a Lorentz, el profesor Arnold Sommerfeld (1868-1951), quien había tenido oportunidad de escuchar una conferencia de Ehrenfest, comentaba sobre él, que «...sabía cómo presentar las cosas más difíciles de una manera concreta e intuitivamente clara. Los argumentos matemáticos los traduce en imágenes fácilmente comprensibles»¹⁴.

Sin embargo, Ehrenfest nunca estuvo satisfecho de su capacidad como físico teórico. En una carta a su amigo Joffe, le expresaba su incapacidad para sentarse a trabajar con la intención de lograr algo «significativo», diciendo que lo único que él había podido lograr era resultado de su impulso por jugar con alguna idea o de su interés en alguna paradoja¹⁵. Esta autodescripción resalta y explica su entusiasmo al hablar sobre la crisis del éter lumínico y las contradicciones que presentaba, en la conferencia inaugural que ofreció como nuevo profesor en Leiden.

3.1. *Ehrenfest y el éter*

Con estos antecedentes, ahora estamos ya listos para dejarnos conducir por Ehrenfest al mundo del éter y su persistente presencia en el mundo de la física clásica. Para conocer el pensamiento de Ehrenfest nos estaremos refiriendo a dos momentos en los que él explícitamente aborda el tema del éter, esto es, a su conferencia inaugural de diciembre de 1912 a la que ya hemos hecho referencia, y a un escrito suyo que data aproximadamente de un año antes en el que hace algunos comentarios en torno a unos planteamientos previos de Albert Einstein de 1909. De aquí en adelante nos referiremos a estas dos fuentes como *la conferencia y el artículo*. La conferencia se titula «Sobre la crisis en torno a la hipótesis del éter lumínico» y el artículo «Sobre la cuestión en torno a lo superfluo del éter lumínico»¹⁶.

En esta sección 3.1, nos referiremos al núcleo de la argumentación de Ehrenfest que aparece en su conferencia inaugural, basada en un experimento imaginario, y en la siguiente sección 3.2 veremos el desarrollo que hace de sus ideas¹⁷. Desde su inicio, la conferencia de Ehrenfest muestra esa preocupación tan característica de él por ir a los puntos medulares de su disciplina, al empezar diciendo:

Permítanme hablarles sobre una crisis que actualmente amenaza seriamente una de las hipótesis fundamentales de la física —la hipótesis del éter—. Me parece que esta crisis nos da una imagen vívida del característico ambiente revolucionario que domina de momento a la física teórica¹⁸.

Inmediatamente procede a utilizar un experimento mental que usará a lo largo de su conferencia para mostrar las dificultades, las contradicciones y las paradojas en torno a la hipótesis del éter:

Supongamos que tenemos una enorme esfera vacía ante nosotros. Mucho más grande que la Tierra, mucho más grande que la órbita de la Tierra. Tan grande, que

un rayo de luz necesitaría cerca de dos horas para atravesarla. Exactamente en el centro de la esfera se encuentra un experimentador. La esfera se encuentra en reposo ante nosotros. El experimentador hace el siguiente experimento: permite que una lámpara muy brillante se encienda por un instante, y espera para ver qué pasa. Primero él ve por un instante la lámpara. Después permanece oscuro por dos horas. Esto es porque la luz viaja durante una hora desde el centro hasta la pared interna de la esfera hueca, y después de reflejarse, necesita otra hora para regresar a donde está el experimentador. Enseguida el experimentador ve iluminarse simultáneamente la pared interna de la esfera por un momento. Luego, todo queda oscuro de nuevo.

Ahora supongamos que se nos da una segunda esfera, idéntica a la primera. Y otra vez, justo en el centro de la esfera, tenemos un experimentador. Pero esta segunda esfera no está en reposo, sino que se mueve a una enorme velocidad, por ejemplo a la décima parte de la velocidad de la luz. El experimentador viaja con ella. El experimentador debe ahora también, exactamente del mismo modo que el primero, dejar encendida por un instante una lámpara brillante, e igualmente, observar qué pasa. Preguntamos: ¿ve el experimentador en la esfera en movimiento también alumbrarse toda la superficie interna en el mismo instante o ve otra cosa? Los físicos de diferentes épocas habrían respondido de formas variadas a esta pregunta.

En un interesante artículo, Thomas Kuhn (1922-1996) argumenta sobre la función de los *experimentos imaginarios* (*Gedankenexperimenten*) a los que, según su opinión, los historiadores de la ciencia deben reconocer como instrumentos valiosos para llegar a una mejor comprensión de la naturaleza¹⁹. Estos experimentos normalmente se sitúan en el centro de un momento de crisis producido por la insatisfacción de ciertas expectativas o la presencia de anomalías persistentes. Según Kuhn, los experimentos mentales tratan a veces de situaciones que no se han examinado en el laboratorio; en otras ocasiones, abordan situaciones que no pueden examinarse físicamente y probablemente ni siquiera pueden darse en la naturaleza. Para Ehrenfest, su experimento es en realidad una versión grotesca de un experimento real, el realizado en 1887 por Albert Michelson (1852-1931) y Edward Morley (1838-1923), pero que le permite presentar de una manera más vívida la controversia que suscitan los resultados *negativos* de dicho experimento.

Kuhn nos dice en su artículo que para que un experimento imaginario sea eficaz, se requiere que, de entrada, nada en el experimento resulte desconocido o extraño, es decir, que sus suposiciones iniciales se tienen que ajustar al aparato mental previo de quienes acuden al experimento y que sólo de esa manera puede contribuir a promover una reforma del pensamiento que dé salida a la crisis. Pero, ¿cuáles son esas suposiciones iniciales en el experimento de Ehrenfest y cuáles son las posibles salidas a la crisis de la hipótesis del éter? Si leemos con cuidado los párrafos iniciales de la conferencia presentados anteriormente, vemos que uno de los puntos de partida es creer que hay una condición de reposo privilegiada, ya que

más adelante en su conferencia, al introducir la idea del éter de Fresnel, nos dice que «el éter estaría en reposo con respecto a las estrellas fijas». Sin embargo, siguiendo de nuevo a Kuhn, para que un experimento mental sea eficaz, los datos indispensables para que ocurra la revolución deben haber existido «en el borde de la conciencia científica»²⁰. El experimento mental es una herramienta en el proceso de las revoluciones científicas para que lo que se conocía de una manera vaga y periférica, se entienda luego con nueva precisión en la visión del mundo que reemplaza a la anterior. En el caso que ocupa a Ehrenfest, esto se manifiesta en cierta forma, como veremos más adelante, cuando al final de su conferencia habla de las nuevas teorías (en particular se refiere a la de Einstein y a la de Walter Ritz-1878-1909-²¹) que proponen prescindir del concepto del éter.

La historia de la ciencia nos ha mostrado la tendencia de la comunidad científica a extender el contenido de sus disciplinas en torno al paradigma existente, evitando cambios revolucionarios, al menos hasta que la acumulación de anomalías sin solución satisfactoria dentro de los estándares de las teorías aceptadas sea ya insostenible. Es decir, es muy difícil para el científico cambiar su aparato mental aún cuando los nuevos datos consistentemente pidan un cambio de concepción. Es lo que Holton llama *suspension of disbelief*, ese proceso en el que el científico asume una serie de creencias que paradójicamente le dan continuidad a una disciplina, pero a su vez juegan un papel esencial en los momentos cruciales²².

3.2. *Pugna entre teorías*

Volvamos a la conferencia de 1912. Ehrenfest se propone comparar las diferentes teorías de la luz, analizando cómo contestarían a la pregunta que plantea en su experimento mental: ¿Ve el experimentador en la esfera en movimiento también alumbrarse toda la superficie interna en el mismo instante, o ve otra cosa? Por un lado contrasta entre teorías emisionistas y ondulatorias, y dentro de las ondulatorias, donde el éter juega un papel más fundamental, la distinción entre quienes asumen un éter rígido, estacionario, y quienes consideran que el éter es «arrastrado» por los cuerpos en movimiento, de manera análoga a como la atmósfera de la Tierra se mueve junto con ella.

Newton, con su teoría de la emisión de la luz, y George Stokes (1819-1903), con la teoría de un éter que es arrastrado, contestarían que el experimentador en movimiento vería lo mismo que el que está en reposo. En cambio, Fresnel con la teoría de un éter rígido diría que el experimentador de la esfera en movimiento ve algo muy diferente. Según Ehrenfest,

En primer lugar ve la lámpara, luego estará oscuro por aproximadamente dos horas, pero luego verá primero iluminarse el ecuador de la esfera (así llamado el

círculo más grande de la esfera perpendicular a la dirección de movimiento de la esfera), posteriormente se iluminarán dos círculos de latitud simétricos al ecuador. Estos círculos se moverán simétricamente hacia los polos. Finalmente se iluminarán simultáneamente los polos de la esfera y luego quedará oscuro de nuevo.

Esto, explica Ehrenfest, resulta de un cálculo elemental basado en la teoría de Fresnel, y que considera el hecho de que al moverse la esfera a través del éter rígido, «los rayos de luz de la lámpara se propagan como ondas circulares y [...] estas ondas circulares son arrastradas por el viento del éter que sopla a través de la esfera-laboratorio», de tal forma que «la propagación y la reflexión de las ondas de luz ya no transcurren tan simétricamente desde el centro de la esfera hueca».

Tanto la teoría del éter rígido de Fresnel como la del éter que es arrastrado de Stokes pertenecen en realidad al mismo *programa de investigación*, usando el lenguaje de Lakatos²³. El *núcleo* de dicho programa de investigación son las leyes del movimiento de Newton, a partir de las cuales se intenta construir una imagen mecánica del mundo. Dentro de la *heurística negativa* de la que habla Lakatos, las diferentes teorías del éter jugarían un papel importante al tratar de explicar una serie de fenómenos conocidos que tienen que ver con la luz, sin rechazar los supuestos mecánicos básicos.

Ehrenfest continúa explicando en su conferencia que la teoría del éter había conseguido una posición de dominio casi total dentro de la física, sobre todo después de los trabajos de James Clerk Maxwell (1831-1879), que mostraban a los fenómenos de la luz como un caso especial de los fenómenos electromagnéticos, alcanzando el éter el status de portador de todos los fenómenos electromagnéticos y no sólo los lumínicos. Heinrich Rudolph Hertz (1857-1894) había transferido la hipótesis de Stokes del éter que es arrastrado a la totalidad de los fenómenos electromagnéticos, mientras que Lorentz había hecho lo propio con la hipótesis del éter rígido de Fresnel. En general, se puede decir que esta última teoría fue la que prevaleció entre los físicos.

Según Lakatos, el papel del experimento es el de contrastar dos o más teorías oponentes que forman parte de un mismo programa de investigación, una de las cuales saldrá victoriosa de acuerdo a los resultados de los experimentos. Es decir, para Lakatos el experimento está al servicio de la teoría. Pues bien, Ehrenfest se pregunta: «¿Cuál fue el momento decisivo para la victoria que la teoría de Fresnel-Lorentz del éter rígido obtuvo sobre la teoría de Stokes-Hertz del éter móvil?». Después de relatar cómo las mediciones de aberración de la luz estelar y los experimentos de Fizeau (1819-1896) hicieron que los físicos se decidieran por la teoría del éter rígido, Ehrenfest nos conduce al momento de la crisis haciéndonos regresar a su experimento imaginario. Nos recuerda que si hemos de creer en la

trionfante hipótesis del éter rígido, entonces «el experimentador en la esfera móvil —debido al viento del éter que fluye por la esfera— vería algo totalmente diferente que el experimentador de la esfera en reposo». Sin embargo, nos dice, en cierto sentido «Michelson ha ejecutado directamente nuestro experimento de la esfera» pero con un aparato de unos cuantos metros de extensión, y no encontró ningún retraso que correspondiera a la iluminación desigual de nuestra esfera.

Nosotros podemos agregar que se han dicho muchas cosas sobre el controvertido experimento de Michelson y Morley y se ha citado en repetidas ocasiones como una prueba definitiva para rechazar el éter. También sabemos que muchas de estas interpretaciones, al igual que con muchos otros experimentos, se han dado en retrospectiva y que, como nos dice Hacking, seguramente su historia no tiene nada que ver con «poner a prueba a Newton y a Einstein»²⁴. No nos detendremos mucho en esto, pero sí queremos mencionar, porque viene al caso, que al lado de filósofos como Lakatos y como Popper con una marcada tendencia explicativa centrada en la teoría, tenemos otros pensadores, como Ian Hacking, que defienden la idea de que la teoría y el experimento se nutren uno del otro, que no hay una subordinación como la sugiere Lakatos, y que de hecho la experimentación puede tener una vida propia, independiente de la teoría²⁵. En ese sentido, quizá los experimentos de Michelson —porque en realidad fueron varios, empezando en 1881— no estaban pensados para poner a prueba diferentes teorías, sino que tenía sus caminos propios que buscaban medir el movimiento de la tierra con respecto al éter —independientemente de teorías— y poner a prueba nuevos recursos tecnológicos —el interferómetro en este caso particular—.

3.3. *Posibles salidas a la crisis*

Con el paso del tiempo se llegó a considerar que la salida correcta a la crisis de la hipótesis del éter viene dada por la teoría de la relatividad especial de Einstein. Sin embargo, en el año en que estamos situados (1912), algunos científicos, por ejemplo Arnold Sommerfeld, ya estaban convencidos de esto; pero muchos otros aún no. Al final de su conferencia, Ehrenfest dejará en el aire el sentimiento de que aún no se tiene una solución completamente satisfactoria a la crisis, pero primero describe, con su característico estilo, e identificando los puntos esenciales, algunos de los trabajos realizados en la última década. Después de explicar la preferencia que se había dado por la teoría del éter rígido y de explicar la incongruencia con los resultados de los experimentos de Michelson y otros, Ehrenfest se pregunta: «¿Cómo reaccionaron los físicos a este resultado siempre negativo de todos los experimentos sobre el viento del éter?». En seguida se dispone a comparar las soluciones dadas por Lorentz, Ritz y Einstein.

Antes de exponer la visión que al respecto tiene Ehrenfest, vale la pena repasar el hecho de que paralelamente a la imagen mecánica del mundo, la física del siglo XIX vio nacer y desarrollarse una imagen de la realidad formada por *campos*. La historia del desarrollo conceptual del campo electromagnético, ligada a nombres como Faraday (1791-1867), Maxwell y Hertz, es muy larga y no la abordaremos aquí²⁶, pero sí recordaremos que los campos electromagnéticos, tras estar inicialmente ligados a las características mecánicas del éter, con el paso del tiempo llegaron a adquirir un status independiente de la materia, como campos de fuerza no reducibles a nada más. Ante estos dos programas de investigación, el mecánico y el electromagnético, hubo intentos de cada uno de ellos de absorber al otro. Particularmente, Lorentz desarrolló, partiendo de la teoría de Maxwell, su teoría del electrón, en la que el campo y los corpúsculos eléctricos aparecen como elementos equivalentes en la comprensión de la realidad. Como muestra clara de la persistencia de las ideas científicas, Lorentz no desechó la idea del éter, y es su trabajo el que primero aborda Ehrenfest como un intento de salvar la crisis expuesta anteriormente. Nos sigue explicando Ehrenfest en su conferencia que, según Lorentz, debido al movimiento a través del éter rígido, las fuerzas entre las moléculas e incluso las formas de las partículas cambian, hipótesis que resulta *ad hoc* para explicar que el viento del éter consiga «escondarse» del experimentador, pues

el viento del éter distorsiona el desarrollo del proceso con el que opera el experimentador; además el mismo viento del éter estropea —si se nos permite expresarnos así— los instrumentos de medición de los experimentadores: deforma las reglas, cambia el curso de los relojes, etc. [...] Y si ahora el experimentador observa con sus instrumentos —que el viento del éter ha estropeado— el proceso distorsionado por el mismo viento del éter, entonces verá exactamente lo mismo que vería el observador en reposo con el proceso no distorsionado y los instrumentos no estropeados.

Así, un efecto cancela al otro, no se puede detectar el viento del éter y ¡se salva la hipótesis del éter!, de cuya existencia muchos científicos no se atrevieron a dudar. Ante esta conclusión a la que Ehrenfest nos lleva, podríamos agregar a nuestra reflexión la pregunta sobre las implicaciones que podría tener esto desde la perspectiva de la filosofía de la ciencia de Karl Popper. Si el viento del éter es indetectable, no estaría sujeto a la falsación de la que habla Popper y tal vez quedaría catalogado desde esta perspectiva como un *concepto no científico*²⁷. Pero por lo pronto dejemos de lado este pensamiento.

En cuanto al experimento de la esfera, continúa Ehrenfest,

tomando como fundamento la hipótesis de que el viento del éter distorsiona las fuerzas moleculares, calculamos que el viento del éter ha deformado la enorme esfera, y aunque la volteemos siempre estará aplastada en la dirección del movi-

miento: los polos quedan ahora más cerca del centro que el ecuador, en cantidad tal que el experimentador ahora sí ve iluminarse los polos exactamente al mismo tiempo que el ecuador. Exactamente como era el caso del experimentador de la esfera en reposo.

Es decir, las dimensiones de la esfera sufren una contracción en la dirección del movimiento, de manera que el tiempo adicional que le costaría a la luz viajar en esa dirección se compensa por la menor longitud a recorrer.

La explicación de Lorentz no requiere deshacerse del éter, pero sí privarlo de sus características mecánicas y proclamar así una concepción electromagnética de la naturaleza. Para Lorentz sigue existiendo un sistema de referencia preferencial del éter, pero aún así logra explicar los fracasos recurrentes al intentar detectar el movimiento de la Tierra a través del éter.

Aunque las ideas de Lorentz tuvieron mucha influencia, y según dice Ehrenfest en su conferencia, nos muestran algunas posibles salidas a la crisis, no todos los físicos estaban satisfechos. Entre ellos se encontraban dos amigos cercanos de Ehrenfest, Walter Ritz y Albert Einstein. Ritz había muerto muy joven, en julio de 1909, y no pudo desarrollar plenamente sus ideas, pero está claro que Ehrenfest las tenía en muy alta estima. Aproximadamente un año antes de su conferencia, escribió el artículo al que hemos hecho referencia al iniciar la sección 3.1., en el que desarrolla algunas de las ideas de Ritz contrastándolas con las de Einstein, a partir de un planteamiento de éste último, que a Ehrenfest le parecía contradictorio. Analizaremos parte de ese artículo y después veremos cómo las ideas que trabajó Ehrenfest en él, las seguía teniendo presentes en su conferencia.

En ese artículo de 1911²⁸, Ehrenfest cita un párrafo escrito por Einstein en un número anterior de la misma revista²⁹ en el que expresa la idea de que es posible renunciar a la hipótesis del éter y considerar que los campos electromagnéticos que forman la luz no son una perturbación de un medio hipotético, sino que están compuestos de entidades independientes que son emitidas por las fuentes de luz como sucede en la teoría de emisión newtoniana (como sabemos muy bien, se trata de uno de los grandes descubrimientos de Einstein realizados en 1905). Ehrenfest se encuentra a disgusto con esta afirmación, pues le parece incompatible con uno de los postulados de Einstein de su teoría de la relatividad, que dice «...que la luz en el espacio vacío siempre se propaga con una velocidad V fija independiente de las condiciones de movimiento de los cuerpos emisores». A este postulado, Ehrenfest lo identifica como [D]³⁰. Para que se cumpla este último postulado, habría que tomar con reservas la comparación que hace Einstein con la teoría de emisión newtoniana, pues nos llevaría a que «la cinemática de los impulsos de luz emitidos ya no se da en la forma simétrica que ocurre en la teo-

ría de emisión de Newton, sino con una simetría con la intensidad exacta que haga que se cumpla el postulado [D]». El problema parece consistir en definir qué entendemos por «teoría de emisión de los fenómenos óptico-electromagnéticos», que Ehrenfest prefiere reservar para las teorías en las cuales la velocidad de la fuente de luz se suma a la velocidad de la luz emitida. Y esto es precisamente lo que había intentado Walter Ritz poco antes de morir al desarrollar una teoría de emisión que no requiriera de contracciones de los cuerpos rígidos ni cambios en el curso de los relojes. Para Ritz, y parece que también para Ehrenfest si nos atenemos a sus conclusiones en el artículo, la hipótesis de Einstein de la constancia de la velocidad de la luz no nos muestra sino «remanentes de la hipótesis del éter que de otra manera ya estaría totalmente eliminada», pues esa velocidad de la luz no es otra sino la velocidad de la luz en el éter proveniente de las teorías de Maxwell y de Lorentz. Así, al comparar las propuestas de Einstein y Ritz, y dejando la puerta abierta a una solución satisfactoria por falta de resultados experimentales que confirmen una u otra, Ehrenfest concluye que «los seguidores de la hipótesis del éter deben desear que el postulado [D] se cumpla cabalmente».

Regresando a la conferencia de diciembre de 1912, en la última parte de la misma, cuando se dispone a hablar de las propuestas de Ritz y Einstein, resulta claro que tenía muy presente sus preocupaciones previas y lo que él había expuesto en su artículo cerca de un año antes. En la conferencia, aunque de nuevo muestra a Einstein como heredero de las ideas de Maxwell y Lorentz, Ehrenfest se encarga de resaltar vívidamente la diferencia entre las dos propuestas (las de Einstein y Lorentz). Nos dice:

Tomemos una fuente de luz A en reposo para nosotros y una segunda fuente de luz B que corre con velocidad mayor con respecto a nosotros. Dejemos que los rayos de luz de ambas fuentes vayan por un tubo vacío, que para nosotros está en reposo y midamos si ambos rayos de luz viajan por el tubo con la misma rapidez o no. ¿Qué resultado tendremos?

Tanto la teoría de Lorentz como la de Einstein responden que se tendrá la misma rapidez³¹, pero para Lorentz esto es «porque la luz de ambas fuentes de luz se propagan en uno y el mismo éter», en tanto que para Einstein es así sin necesidad de dar ninguna razón, pues «Einstein pone esta declaración más bien como postulado a la cabeza de su teoría».

Tanto en su artículo como en la conferencia, Ehrenfest se muestra escéptico respecto al tratamiento einsteniano. En el artículo se pregunta: «¿Es este punto de vista “físicamente satisfactorio”? ¿o está uno “autorizado”, si no es que “obligado” a requerir una explicación de “por qué” los impulsos de luz en el espacio vacío se dispersan con la asimetría exacta, de manera que se cumpla el postula-

do [D]?). Recordemos que el postulado [D] es el de la constancia de la velocidad de la luz. En sus agudas preguntas se vislumbra la necesidad interna de Ehrenfest por proveer de plausibilidad física a las teorías. Ya casi al final de su conferencia, nos informa sobre los tres puntos a los que nos debemos suscribir si hemos de aceptar los puntos de vista de Einstein. El primero es que debemos aceptar que la luz emitida por las fuentes aparece como entidad independiente de la existencia de un éter. El segundo es que la velocidad de la luz es la misma independientemente del movimiento de las fuentes de donde proviene la luz. Y tercero, como no convencido de la compatibilidad de los anteriores, es que debemos declarar que nos satisface la combinación de los dos puntos anteriores.

Martin Klein nos explica que la dificultad de Ehrenfest en esta lucha interna por comprender las propuestas de Einstein estriba en que Ehrenfest trataba de dar una *justificación epistemológica* a la teoría de Einstein de 1905 por medio de la no existencia del éter, en tanto que Einstein había basado sus argumentos «en la equivalencia *empírica* de todos los sistemas inerciales con respecto a la luz»³². Es interesante mencionar que esta insatisfacción con las propuestas de Einstein prevalece más adelante con la teoría general de la relatividad. Después de haber cultivado una gran amistad en la que se permitían hablarse con mucha confianza, en una carta Ehrenfest le cuestiona: «Einstein, mi irritado estómago odia tu teoría - ¡casi te odia a ti mismo! ¿Cómo puedo enseñar a mis alumnos? ¿Qué les voy a responder a los filósofos?»³³.

Ehrenfest termina su conferencia con una rápida referencia «al conjunto confuso de problemas, al cual usualmente marcamos ahora con la expresión «cuanto de luz»», sugiriendo que esas nuevas ideas podrían tener un papel decisivo en la solución a la crisis de la hipótesis del éter, pero de momento deja a su audiencia con el sentimiento de que cosas muy interesantes están por venir en el desarrollo de la física.

4. ¿Muerte de la hipótesis del éter?

Aunque habían intercambiado correspondencia desde hacía algún tiempo, Ehrenfest y Einstein se conocieron personalmente en Praga en febrero de 1912 (diez meses antes de la conferencia de Ehrenfest a la que hemos hecho referencia en este artículo) y a partir de ahí cultivaron una gran amistad. Los unieron sus mismos intereses científicos, su común ascendencia judía, su gusto por la música, etc. En noviembre de 1919, Ehrenfest le comunicaba a Einstein su tentativa para ofrecerle una posición como Profesor Especial en Leiden que podría significar tenerlo cerca por tres o cuatro meses cada año. Estos planes se concreta-

ron casi un año después y Einstein ofreció su conferencia inaugural en Leiden bajo el título de *El éter y la teoría de la relatividad*, en la cual podemos encontrar, para nuestra sorpresa, la resurrección del éter³⁴.

Como vimos, de alguna manera Ehrenfest ya había anticipado ocho años antes que el éter no había sucumbido del todo, pese a todos los experimentos que intentaron inútilmente detectar el viento del éter y pese a que Einstein, en su «Zur Elektrodynamik Bewegter Körper» («Sobre la Electrodinámica de los Cuerpos en Movimiento») de 1905, había declarado que «la introducción de un «éter lumínico» se mostrará superflua, puesto que la idea que se va a desarrollar aquí no requerirá de un «espacio en reposo absoluto»»³⁵.

Sin embargo, en su conferencia de 1920, Einstein prefiere matizar su visión del éter a la luz de sus últimas investigaciones. En efecto, nos dice Einstein, con Lorentz aún se tenía un éter al cual se le había despojado de todas sus cualidades mecánicas, excepto su inmovilidad. Los físicos se deshicieron de él, pues resultaba «inaceptable» e «intolerable» esa asimetría en la estructura teórica sin una asimetría correspondiente en el sistema de experiencia (la equivalencia *empírica* de todos los sistemas inerciales con respecto a la luz, a la cual nos habíamos referido en la sección anterior). Sin embargo, nos dice Einstein, «la teoría especial de la relatividad no nos obliga a negar el éter» siempre y cuando no se le quiera asignar un estado definido de movimiento —la inmovilidad—, es decir, se puede conservar el éter pero retirándole el último atributo mecánico que Lorentz le había dejado. Después de todo «hay un argumento de peso que se puede aducir a favor de la hipótesis del éter [...] negar el éter es en última instancia afirmar que el espacio no tiene ningún tipo de cualidad física [...] y los hechos fundamentales de la mecánica no armonizan con este punto de vista».

Mas aún, con la teoría general de la relatividad, el concepto del éter «ha adquirido de nuevo un contenido inteligible, aunque este contenido difiere ampliamente del éter de la teoría de la luz mecánico ondulatoria [...] el continuo espacio-tiempo posee cualidades métricas y en ese sentido se puede seguir hablando de un éter». Es sabido que la elaboración de la relatividad general llevó consigo un cambio fundamental en la concepción filosófica de Einstein, que pasó de ser positivista a ser idealista. A partir de entonces, el concepto de *campo* volvió a ser fundamental (por ejemplo, no habla para nada de *gravitones*, lo cual no deja de ser curioso, siendo la misma persona que *inventó* los cuantos de luz). Este Einstein maduro es el que reinventa, aparentemente, el éter, en relación a la relatividad general (aunque, también hay que decirlo, sin ser demasiado explícito).

En resumen, ante nuevas conjeturas que abrieron la posibilidad de una nueva interpretación del espacio y el tiempo, «el éter revive con un ropaje más sutil e

inmaterial»³⁶, o como el mismo Einstein llegó a decir, esa arquitectura inmaterial del espacio-tiempo de su teoría de la relatividad, podía entenderse como una especie de *éter rehabilitado*. Con Einstein, la luz se concibe como una onda electromagnética, pero sin un medio material que soporte su movimiento.

En realidad, durante toda la historia, la física ha manifestado una especie de *horror al vacío*, que permanece hasta la actualidad. Tras el derrocamiento de la idea original aristotélica del *horror vacui* con los experimentos de Torricelli, el desarrollo de la teoría electromagnética del siglo XIX pareció dar la razón de nuevo a Aristóteles con la necesidad de que el éter lo llenara todo. Tras la negación de la hipótesis del éter por parte del Einstein de 1905, la idea de que hay algo que lo llena todo volvió con la Teoría Cuántica de Campos, donde el *vacío* asumió un papel parecido al éter clásico, con su potencialidad para generar, por ejemplo, pares de partículas. Incluso hay algún físico moderno importante (como F. Wilczek, premio Nóbel en 2004) que mantiene abiertamente que el éter existe. De esta manera, desde hace casi un siglo, el éter perdió su último vestigio de materialidad, pero pudo ser recuperado —hasta la actualidad— como elemento determinante de las relaciones métricas en el continuo espacio-tiempo.

5. Conclusiones

La historia del éter, las luchas conceptuales en torno a él y la vívida imagen que de todo ello hemos obtenido analizando la conferencia y el artículo de Ehrenfest pueden servirnos como ejemplo de la forma en que progresa la ciencia. Se mencionaba en un apartado anterior cómo las creencias científicas juegan un papel muy importante en los momentos cruciales. Gerald Holton nos sugiere que las innovaciones surgen de un balance entre las creencias o *themata* que por un lado comparten los científicos y que les permite comunicarse significativamente, y por otro las diferencias que representan esa libertad intelectual y que da lugar a las nuevas ideas³⁷. En la búsqueda por alguna salida a la crisis de la hipótesis del éter lumínico, la lectura que hace Ehrenfest del tema nos permite recorrer algunas de las ideas de Lorentz, Ritz, Einstein y otros científicos en un momento histórico en el que todas las ideas, viejas y nuevas, estaban en juego en el campo de su disciplina, donde la movilidad y el avance en la comprensión del mundo físico estará dictado por ese fino balance de temas que definen las imágenes del mundo del científico. Einstein mismo consideraba su trabajo no tanto como revolucionario, sino como resultado de una evolución natural de lo que previamente había sido edificado por Maxwell y Lorentz. Y es que, en efecto, Einstein compartía con ellos ciertas creencias o presuposiciones en el sentido de que la realidad física

debía describirse en términos de entidades continuas (los *campos*), aunque difería de ellos en otros aspectos, por ejemplo en el papel que debería jugar el éter.

A la luz de la física moderna, podría decirse que el éter, en su sentido clásico, no existe, que fue una ficción hipotética nacida de la imaginación materialista. Pero desde una perspectiva histórica, como lo vimos a través de este emocionante recorrido por el que nos dejamos llevar de la mano de Paul Ehrenfest, el éter fue a lo largo del siglo XIX y parte del XX un concepto muy persistente en la mente de los científicos como forma de hacer inteligible muchos fenómenos físicos a través de una visualización mecánica tan característica de esos tiempos. La física clásica veía al mundo inanimado como regido por las leyes mecánicas de Newton y las leyes electromagnéticas de Maxwell, y dentro de esa imagen del mundo físico, el éter jugó un papel esencial que prevaleció por mucho tiempo, dada la inclinación de los físicos para proteger el corpus del conocimiento de su disciplina como existía en el momento. Pero al final, las incompatibilidades entre la mecánica newtoniana y las leyes del electromagnetismo llevaron a hombres como Einstein y otros a sugerir nuevos caminos y a arriesgarse a imaginar nuevas posibilidades, guiados por la creencia de que el mundo tiene una estructura unitaria.

NOTAS

1. Citas tomadas de HOLTON [1998b, p. 4].
2. Citado en ZAJONC [1996, p. 149].
3. Véase KLEIN [1993, p. 5].
4. Paul Ehrenfest nació en Viena en 1880, en el seno de una familia judía. Durante sus estudios tuvo una enorme influencia de Boltzmann. Tras pasar un tiempo en Gotinga y después en San Petersburgo, en 1912 fue propuesto para ocupar una cátedra en Leiden. Allí permanecería el resto de su vida académica. Fue amigo de algunos de los científicos más importantes del siglo, como Einstein y Bohr. Se convirtió en una pieza clave dentro de la *teoría cuántica antigua*, pero tuvo dificultad para entender la nueva mecánica cuántica. A pesar de sus aportaciones, tenía una valoración pésima de sí mismo. Fue siempre una figura torturada, y acabó su vida suicidándose en 1933.
5. Véase GAMOW [1966, p. 52].
6. No en vano sus estudiantes se referían a él como «tío Sócrates» [KLEIN, 1989, p. 41].
7. Podemos encontrar las ideas de Popper en una de sus obras más clásicas: *Conjeturas y refutaciones* (POPPER [1991]).
8. Véase HOLTON [1998a, p. 8].
9. Véase ZAJONC [1996, p. 24].
10. Véase WHITTAKER [1951, vol. 1, p. 5].
11. Véase BOLTZMANN [1986, p. 170].
12. Véase KLEIN [1985].

13. Véase KLEIN [1989, p. 30].
14. Citado en KLEIN [1989, p. 31].
15. Carta de Ehrenfest a Joffe, 20 de febrero de 1913, citada en Klein [1985, p. 15].
16. Los títulos originales de la conferencia y el artículo son, respectivamente, «Zur Krise der Lichtäther-Hypothese» y «Zur Frage nach der Entbehrlichkeit des Lichtäthers», este último presentado originalmente en el *Phys. Zeit.* 13, 317-319 (1912). Ambos se encuentran en Ehrenfest [1959, pp 303-327], que es la colección de trabajos científicos de Ehrenfest editada por Martin Klein.
17. Parte de nuestro análisis de la conferencia está basada en la descripción que Klein hace de este momento clave de la vida de Ehrenfest, en el capítulo 1 de su biografía. Véase Klein [1985, pp. 1-5].
18. Todas las citas de Ehrenfest en la sección 3 provienen de *la conferencia y el artículo*, pero a este último no se hará referencia hasta que lleguemos a la sección 3.3. Hasta donde sabemos, no existen traducciones al español o al inglés de estos documentos. La traducción al español de las citas es nuestra y proviene directamente del original en alemán.
19. Véase KUHN [1982].
20. Véase KUHN [1982, p. 287].
21. Walter Ritz es famoso por su *principio de combinación*, de 1903, clave para interpretar los espectros atómicos. Einstein y Ritz publicaron conjuntamente una *Nota* donde explicaban sus diferencias sobre el problema de la radiación [*Phys. Zeit.* 10, 323-324 (1909)].
22. Véase HOLTON [1998b, p. 12].
23. Podemos encontrar las ideas de Lakatos en su obra clásica *Escritos filosóficos. 1. La metodología de los programas de investigación científica* (LAKATOS [2002]).
24. Véase HACKING [1985, p. 283].
25. Lakatos es uno de los filósofos de la ciencia que más duramente criticó a Popper en su concepción de los *experimentos cruciales*. Para él, una teoría bien establecida (un *programa de investigación*, en términos lakatosianos) no se viene abajo con un simple experimento. Es decir, según Lakatos, los experimentos cruciales no existen. Él pone como ejemplo precisamente el famoso experimento de Michelson-Morley, considerado comúnmente como el que falsó la teoría del éter. Lakatos muestra que la historia del experimento y del desarrollo de la física en las siguientes décadas nos hacen ver que ese experimento no fue tan «crucial» como a veces se ha considerado (Véase LAKATOS [2002, pp. 98-102]). También Hacking se ocupó de ese famoso experimento, basándose en parte en Lakatos, pero al mismo tiempo dando una explicación diferente a éste (Véase HACKING [1985, pp. 282-289]). Del mismo modo, podemos encontrar una propuesta en la misma dirección, para el desarrollo de una filosofía de la experimentación, en FERREIROS & ORDÓÑEZ [2002].
26. Ver por ejemplo HARMAN [1990, pp. 93-145].
27. Aquí podríamos hacer un análisis profundo sobre la *visión instrumental* versus la *visión realista* de la ciencia, lo cual nos llevaría a cuestiones interesantes de filosofía de la ciencia y de teoría del conocimiento. Sin embargo, ese análisis se sale del propósito del presente trabajo.

28. Recordemos que estamos hablando de «Zur Frage nach der Entbehrlichkeit des Lichtäthers» («Sobre la cuestión en torno a lo superfluo del éter lumínico»), publicado en el *Phys. Zeit.* 13, 317-319 (1912).
29. *Phys. Zeit.* 10, 819 (1909).
30. En su artículo, Ehrenfest enumera con letras las distintas hipótesis, asunciones y postulados que manejan Einstein y Ritz en sus respectivas ideas sobre la luz y el éter, para poder analizar las consecuencias de ambas teorías de una manera más cómoda.
31. El uso en este artículo de los términos *velocidad* y *rapidez* no es gratuito. En la conferencia, se usa mucho el término *Geschwindigkeit*, que es lo que más directamente podríamos traducir como *velocidad*. Sin embargo, en el fragmento donde hablamos de *misma rapidez*, en el original en alemán podemos leer *Gleich rasch*, que más literalmente se traduciría como *igual de rápido*. Ehrenfest lo está usando aquí como otra forma de decir que tienen la misma velocidad.
32. Véase KLEIN [1985, p. 135].
33. Carta de Ehrenfest a Einstein, 24 de noviembre de 1919, citada en KLEIN [1985, p. 315].
34. Esta interesante conferencia se puede encontrar en el libro *Sidelights on relativity* (Dover, 1983), donde se recogen dos conferencias de Einstein: «Ether and relativity», a la cual nos estamos refiriendo aquí y de donde están tomadas las citas de este apartado, y «Geometry and experience». También se puede consultar esa conferencia de 1920 en la siguiente dirección de Internet: http://www.mountainman.com.au/aether_0.html (traducción al inglés). Se encuentra también una pequeña parte de la conferencia en http://www.alberteinstein.info/PDFs/CP7Doc38_pp305-309_321.pdf (original en alemán).
35. Cita tomada de la traducción al español en Stachel [2001, p. 112].
36. Véase ZAJONC [1996, p.272].
37. Véase HOLTON [1998b, p. 26-27].

BIBLIOGRAFÍA

- BOLTZMANN, L. (1986) *Escritos de mecánica y termodinámica*. Madrid, Alianza Editorial. Traducción, introducción y notas de Javier Ordoñez.
- EHRENFEST, P. (1959) *Collected Scientific Papers*. M. J. Klein, editor. Amsterdam, North-Holland Publishing Company.
- EINSTEIN, A. (1983) *Sidelights on relativity*. Nueva York, Dover.
- FERREIROS, J. & ORDOÑEZ, J. (2002) «Hacia una filosofía de la experimentación». *Crítica, Revista Hispanoamericana de Filosofía*, 34(102), 47-86.
- GAMOW, G. (1985) *Thirty years that shook physics*. New York, Dover Publications. Edición original de 1966 por Doubleday & Co.
- HACKING, I. (1996) *Representar e intervenir*. México, Paidós. Traducción de la edición en inglés, Cambridge University Press, 1983.
- HARMAN, P.M. (1990) *Energía, fuerza y materia: el desarrollo conceptual de la física del siglo XIX*. Madrid, Alianza Editorial. Traducción de la edición en inglés, Cambridge University Press, 1982.

- HOLTON, G. (1998a) *La imaginación científica*. México, Fondo de Cultura Económica.
- HOLTON, G. (1998b) *The advancement of science, and its burdens*. Cambridge, Harvard University Press.
- KLEIN, M. (1985) *Paul Ehrenfest: The making of a theoretical physicist*. Ámsterdam, North-Holland Physics Publishing.
- KLEIN, M. (1989) «Physics in the Making in Leiden: Paul Ehrenfest as Teacher». En: A. Sarlemijn y M.J. Sparnaay (eds.) *Physics in the Making: Essays on Developments in 20th Century Physics*. Ámsterdam, North-Holland, 29-44.
- KLEIN, M. (1993) *Physicists' Inaugural Lectures in History*. Ámsterdam, Ámsterdam University Press.
- KUHN, T. (1982) «La función de los experimentos imaginarios». En: T. S. Kuhn *La tensión esencial*. México, Fondo de Cultura Económica, 263-289. Traducción de la edición en inglés, University of Chicago Press, 1977.
- LAKATOS, I. (2002) *Escritos filosóficos. 1. La metodología de los programas de investigación científica*. Madrid, Alianza. Traducción de la edición original, 1982.
- ORDOÑEZ, J. (2001) «Sociedad Industrial y Pensamiento Positivista». En: J. L. Villacañas (ed.) *La filosofía del siglo XIX*. Madrid, Trotta.
- POPPER, K. (1991) *Conjeturas y refutaciones*. Barcelona, Paidós. Traducción de la edición original, 1963.
- STACHEL, J. (ed.) (2001) *Einstein 1905: un año milagroso – cinco artículos que cambiaron la física*. Barcelona, Editorial Crítica. Traducción de la edición en inglés, Princeton University Press, 1998.
- WHITTAKER, E. (1951) *A History of the Theories of Aether and Electricity*. New York, Thomas Publishers, 2 vols.
- ZAJONC, A. (1996) *Atrapando la luz: Historia de la luz y de la mente*. Barcelona. Editorial Andrés Bello Española. Traducción de la edición en inglés, Nueva York, Bantam Books, 1993.