

Guzmán Díaz, Ricardo; Gándara Tovar, Aída Judith
La función de las paradojas en la física y el caso de Paul Ehrenfest
Entreciencias: diálogos en la Sociedad del Conocimiento, vol. 3, núm. 6, abril, 2015, pp.
13-26
Universidad Nacional Autónoma de México
León, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=457644944002>

La función de las paradojas en la física y el caso de Paul Ehrenfest The function of the paradoxes in physics and the case of Paul Ehrenfest

Recibido: 21 de agosto de 2014; aceptado: 6 de enero de 2015

Ricardo Guzmán Díaz¹, Aída Judith Gándara Tovar²

Tec de Monterrey, campus Monterrey

Resumen

En el presente artículo se propone una tipología para el análisis de las paradojas en las ciencias físicas y se ejemplifican a través de algunos elementos de la obra de Paul Ehrenfest, quien se caracterizó por poseer un interés especial en la identificación de las mismas como forma de ejercicio crítico en su disciplina.

La clasificación sugerida propone cuatro casos: el conflicto directo con el experimento real, el que surge de manera franca con la consistencia lógica de un aparato conceptual muy específico, el que resulta de la relación y las posibles inconsistencias entre teorías en principio independientes en la física y, finalmente, el conflicto con el sentido común. A lo largo del artículo se analiza la relación entre experimentos reales, experimentos imaginarios y paradojas, buscando clarificar la función de estas últimas atendiendo al carácter simplificador y reduccionista de la física.

Palabras clave: experimentos reales, experimentos imaginarios, paradojas, conocimiento.

Abstract

This article proposes a typology for the analysis of paradoxes in the physical sciences and offers examples through some elements of the work of Paul Ehrenfest, who was characterized by a particular interest in identifying them as a form of critical exercise in his field. The suggested classification proposes four cases: the direct conflict with the actual experiment, that which arises frankly with the logical consistency of a very specific conceptual apparatus, the one which results from the relationship and possible inconsistencies between theories in principle independent in physics and finally, the conflict with common sense. Throughout the article the relationship between real experiments, thought experiments and paradoxes is analyzed, trying to clarify the role of the latter based on the reductionist nature of physics.

Keywords: real experiments, thought experiments, paradoxes, knowledge.

INTRODUCCIÓN

Decir que la realidad es compleja es enunciar una verdad de Perogrullo; sin embargo, en las últimas décadas, encomiables esfuerzos intelectuales en campos filosóficos y científicos han puesto de manifiesto, de manera más patente, dicha complejidad en muy diversos ámbitos.³ Dicha complejidad se expresa tanto en las dimensiones

epistémicas o de representación del conocimiento, como sociológicas y culturales. En este espacio, nos ocuparemos fundamentalmente de la esfera epistémica y nos referiremos a cómo, dada esa complejidad, cualquier intento de codificar el comportamiento del mundo lleva una simplificación que en diferentes momentos

¹ Doctor en Estudios Humanísticos con especialidad en Ciencia y Cultura. Profesor investigador, Tecnológico de Monterrey. Líneas de investigación: Historia Filosofía de la Física. Correo electrónico: rguzman@itesm.mx.

² Doctoranda en Estudios Humanísticos con especialidad en Ciencia y Cultura del Tecnológico de Monterrey. Líneas de investigación: Historia y Filosofía de la Física. Correo electrónico: aidag62@prodigy.net.mx

³ Pensemos por ejemplo en la multiplicidad de perspectivas de la filosofía de la ciencia a partir del giro histórico impuesto por Tomas Kuhn, o en el desarrollo de las ciencias de la complejidad o de los estudios culturales de la ciencia.

estalla en paradojas que permiten revelar limitaciones en nuestras formas de entender la realidad y sirven por lo tanto para reconducir el pensamiento. Para Edgar Morin, de hecho, la ciencia misma es una paradoja. Se nos aparece, nos dice, como “elucidante, enriquecedora, conquistadora, triunfante”, pero al mismo tiempo, nos advierte, aporta “terroríficas posibilidades de sojuzgamiento” (1984: 32), idea que enfatiza los aspectos sociales del fenómeno del conocimiento.

Pero, repetimos, trabajaremos sin olvidar por completo ese ámbito sociocultural mayor, que, de todas maneras, puede ser relevante de manera colateral. Aquí queremos ocuparnos fundamentalmente de algunos aspectos epistémicos de las ciencias de la naturaleza más duras, aquellas cuyo objetivo es dilucidar la realidad física y sus elementos fundamentales: espacio, tiempo, materia, etc. Se reconocen con claridad las dimensiones empírico-experimental y lógico-racional en la actividad científica. La primera aportaría los datos objetivos sobre el mundo; la segunda, estaría encargada de la elaboración teórica que abone en el ámbito de los niveles de comprensión y predicción de nuevos hechos.

En medio de las dos dimensiones mencionadas, en una zona borrosa, difusa, se encuentra el uso de experimentos imaginarios y de paradojas para la elucidación de conceptos y la búsqueda de nuevas vías de pensamiento. Recientemente se ha escrito bastante sobre el papel de los experimentos imaginarios, de lo cual haremos aquí una revisión, pero el papel de las paradojas, aunque íntimamente ligado, nos parece que no ha quedado suficientemente precisado. Por esa razón, queremos proponer, como objetivo central en este ensayo, una tipología para el análisis de las paradojas en las ciencias físicas compatible con la visión del cambio científico de Lakatos; además, tratar de entender la función de las mismas en cada uno los casos sugeridos, y ejemplificarlas a través de algunos elementos de la obra de Paul Ehrenfest, quien se caracterizó por un interés especial por la identificación de paradojas como forma de ejercicio crítico en su disciplina.

A lo largo del artículo analizaremos la relación entre experimentos reales, experimentos imaginarios y paradojas, sobre la base del carácter simplificador y reduccionista de la física. Atendiendo a la caracterización clásica del conocimiento como creencia verdadera justificada,⁴

y a partir de la tipología propuesta y los ejemplos ofrecidos, estaremos apoyando, a manera de objetivo secundario, la hipótesis que sugiere que la paradoja es un elemento crucial para la adquisición de nuevo conocimiento en el campo de las ciencias físicas y que uno de los caminos que conducen a ese logro consiste en apuntar hacia un error conceptual, simplificar la imagen del fenómeno y asimilarlo a una nueva propuesta teórica.

TEORÍAS, EXPERIMENTOS Y PARADOJAS

Una paradoja es un argumento que parte de premisas aparentemente ciertas que, tras un proceso lógico de inferencia, ya sea deductivo o inductivo, conduce a conclusiones contradictorias. Esta es quizás una definición útil, pero muy general, y que tiene que matizarse según el área de conocimiento y los casos que se analicen, de manera que en su momento la estaremos ajustando según las necesidades argumentativas.

Las paradojas se presentan en todos los campos del conocimiento, pero aquí nos ocuparemos fundamentalmente de las que ocurren en las ciencias físicas, por lo que estarían en el contexto de la descripción física de la realidad. La paradoja nos enfrenta a “lo que no puede ser” según la concepción que se tenga en un momento dado del mundo, y como el mundo simplemente “es”,⁵ la paradoja estaría alertando al científico de un problema en su esquema conceptual o planteamiento teórico. La pregunta central resulta entonces: ¿la identificación de la paradoja en sí es útil en el sentido de que conduce a nuevo conocimiento, o cuáles serían las condiciones para que así suceda? Para adentrarnos en esta interrogante, es fundamental un análisis de la relación que guardan las paradojas en las ciencias físicas con la teoría y el experimento.

La física, como ciencia natural, es una actividad humana en busca de conocimiento avalado fundamentalmente en la evidencia experimental y en procesos de discusión crítica y racional y de elaboración de teorías. Diversas corrientes de la filosofía de la ciencia han destacado de manera preponderante la teoría y han centrado sus intereses en saber cómo se cambia de teoría, qué significa reducir una teoría a otra, cómo se evalúan y se comparan entre sí las teorías, etc. No es este el lugar para

griego y que aparece por lo menos desde el *Teetetos* de Platón.

⁵ Habría que acotar que esta afirmación es en sí una posición filosófica, pero es la que todo científico asume consciente o inconscientemente.

⁴ Nos referimos, por supuesto, a la definición proveniente del pensamiento

hacer una revisión exhaustiva de dichas escuelas de pensamiento, pero nos tomaremos la libertad de referirnos a un autor en particular, Imre Lakatos, por considerar que su visión del cambio científico es relevante para la discusión presente.

La visión de Lakatos engloba parte de las conocidas propuestas de Popper (1991 [1963]) y de Kuhn (1971). Popper nos ofrece una visión del cambio científico en la que considera que el progreso de la ciencia no consiste en la verificación de sus propuestas, sino en la posibilidad de evidenciar su falsedad (principio de falsación). La filosofía de la ciencia de Lakatos acepta el principio de falsación de Popper, pero no en su forma ingenua de considerar que una teoría puede ser falsada por un solo enunciado observacional. En su lugar, introduce el “falsacionismo sofisticado”, el cual expresa que una teoría o un programa de investigación (el equivalente al paradigma de Kuhn) sólo puede ser falsado proponiendo una nueva teoría que sea más completa, en el sentido de explicar cosas que la anterior teoría no explicaba, y de predecir nuevos hechos, es decir, de tener un exceso de contenido empírico en comparación con la teoría anterior.

Este tipo de propuestas han aportado, por supuesto, elementos valiosos para la reflexión filosófica, pero hay quienes consideran que ha habido una tendencia exagerada a privilegiar los aspectos teóricos del conocimiento sobre otros de sus rasgos, sobre todo el referente a la experimentación. Ian Hacking critica que los filósofos de la ciencia han centrado su discusión en torno a las teorías y la representación de la realidad, y sugiere que desde un punto de vista filosófico, se le debe prestar más atención a la ciencia experimental (1996: 177-178). La “miseria del teoreticismo” (Ferreiros y Ordóñez, 2002: 53) consistiría precisamente en limitar la riqueza y la complejidad de la actividad científica a una serie de procesos de mera elaboración conceptual sin darle el lugar que merece a la experimentación. Esta “tradición teoreticista” de la filosofía de la ciencia es quizás explicable si pensamos que la física fue en buena medida la ciencia natural de la que surgieron los modelos a seguir del método científico y que esa ciencia sufrió una escisión a mediados del siglo XIX, surgiendo la física teórica como una subdisciplina en buena medida autónoma dentro de la comunidad de los físicos. No profundizaremos más en este aspecto pero nos parece pertinente mencionarlo aquí dado que al

personaje que tomaremos como ejemplo en este artículo, Paul Ehrenfest, es precisamente un físico fundamentalmente teórico.

Pero para ubicar el papel de las paradojas en los procesos teórico-experimentales de la física, y reconociendo, como lo hemos hecho en el párrafo anterior, la importancia de las dos dimensiones, regresemos por un momento con Lakatos, quien nos dice que un programa de investigación científica consta de un núcleo duro constituido por las ideas centrales (el paradigma propiamente) aceptado por convenio por la comunidad científica y un cinturón protector de ideas auxiliares cuya misión es impedir que el núcleo pueda ser refutado empíricamente. Es decir, contrario a Popper, Lakatos considera que los resultados empíricos no van a falsar tan fácilmente la teoría, sino que van a dar lugar a la construcción de ese cinturón protector. Las anomalías, que Lakatos define como “fenómenos que se observan ahí afuera en el mundo o en el experimento” y que se considera que deben de poder ser explicados en términos del programa de investigación (2002 [1978]: 97), es decir, asimilados por el paradigma en curso, se incorporan al cinturón protector para poder mantener intacto el núcleo de la teoría o del programa de investigación. Ahora bien, un programa de investigación puede ser progresivo o regresivo. Si es regresivo, eventualmente será sustituido por otro programa de investigación con un núcleo central diferente. De acuerdo con esta interpretación, propondremos más adelante una tipología para las paradojas, pero antes tenemos que abordar con cuidado, por su importancia en relación con las paradojas, el caso de los experimentos imaginarios.

En cierto sentido, el experimento imaginario se encuentra a medio camino entre la teoría y el experimento real. Este tipo de recurso nos habla de proponer una experiencia natural, pero sin llevarla a cabo más que mentalmente, con la expectativa de que nos brinde información válida sobre el mundo poniendo a prueba la consistencia de la teoría. No hace falta mencionar la importancia que para algunos científicos han tenido los experimentos imaginarios, pero para fines de nuestra argumentación puede ser relevante recordar uno de ellos. Pensemos en Galileo y en su razonamiento en contra de la visión aristotélica de la caída libre de los cuerpos, más allá de cualquier experimento real que haya existido. Su experimento mental es descrito en sus *Diálogos acerca de*

dos nuevas ciencias y muestra, con el aparato conceptual con que contaba en ese momento, que todos los cuerpos, sin importar su peso, caen a la misma velocidad. Explica *Salviati*, uno de los personajes de los *Diálogos*:

Si tuviésemos dos móviles de velocidades naturales diferentes, sería de esperar que, uniendo el más tarde con el más veloz, éste sería en parte retardado por el más tarde, y el más tarde en parte acelerado por el más veloz [...] pero si esto es así, y es también verdad que una piedra grande se mueve, supongamos, con ocho grados de velocidad, y una menor con cuatro, al unir las dos, el sistema compuesto tendrá que moverse con velocidad menor de ocho grados; sin embargo las dos piedras unidas, hacen una piedra mayor que la primera, que se movía con ocho grados de velocidad [...] este compuesto (que es mayor que la primera piedra sola) se moverá más lentamente que la primera piedra sola, que es menor [...] ya ves, pues, que del suponer que el móvil más pesado se mueve más velozmente que el menos pesado, yo infiero que el más pesado se mueve más lentamente [...] de esto se deduce que, tanto los móviles grandes como los pequeños, se mueven con igual velocidad (Galilei, 2003 [1638]: 97-99).

Galileo llega a una paradoja o contradicción con lo cual desacredita la visión de Aristóteles, pero eso le permite adicionalmente concluir lo que a él le parece evidente: se mueven con igual velocidad. Surge una nueva creencia con una evidencia no empírica en sentido estricto, pero aparentemente bastante sólida a partir del escenario imaginado. Esto nos lleva a las preguntas cruciales que algunos filósofos han planteado en torno a los experimentos mentales: ¿Pueden proporcionar conocimiento *a priori*?, ¿bajo qué condiciones puede ocurrir tal cosa?, ¿qué clase de conocimiento pueden aportar? Thomás Kuhn (1982), en un interesante ensayo donde aborda el tema, argumenta sobre la función de los experimentos imaginarios a los que, según su opinión, los historiadores de la ciencia deben reconocer como instrumentos valiosos para llegar a una mejor comprensión de la naturaleza. 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. Nos explica 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.

La pregunta central es sobre el estatus epistémico de los juicios a los que un experimento imaginario conduce y el tipo de evidencia que puede proveer en defensa de alguna teoría. Sobre este punto encontramos recientemente visiones.⁶ Norton (2004) sugiere que todo experimento mental es en realidad un argumento en el que no se puede ir más allá de las premisas empíricas de las cuales se parte. En el otro extremo, Brown (2004), en la misma línea que Kuhn, sostiene que el experimento mental sí puede permitir ir más allá de los datos de partida y alcanzar “intuiciones” respecto a las leyes naturales, generando así conocimiento *a priori* acerca de la naturaleza.⁷ Estas disputas quedan en el escenario de la controversia idealismo versus empirismo en el sentido de tratar de discernir si una capacidad meramente racional, no perceptual, puede conducir al conocimiento de aspectos contingentes de la realidad. En este mismo sentido, Gendler (2004) se cuestiona si las nuevas creencias a la que arriban los científicos por medio de los experimentos imaginarios son simples inferencias a partir de las premisas con las que se cuenta, y en caso de no ser así, si las nuevas creencias se pueden considerar justificadas para enmarcarlas en la concepción tradicional de conocimiento a que hicimos referencia previamente. La argumentación y los ejemplos que analiza Gendler en su artículo conducen a que las nuevas creencias generadas a partir de escenarios imaginarios pueden producirse de manera quasi-observacional y ser suficientemente confiables como fuente de justificación; hay cosas nuevas

⁶ Ya hemos dicho que aquí nos interesa el papel y la naturaleza de los experimentos mentales en la ciencia, particularmente en la física. Para una visión más general, y para una consideración sobre el papel de dichos experimentos en el conocimiento filosófico es necesario consultar otras fuentes. Véase por ejemplo Machery (2011).

⁷ Brown es un autor muy prolífico en torno al tema. Para una exposición más amplia se puede consultar su libro *The laboratory of the mind* (2011) y un artículo más reciente que se enfoca en el tema de la visualización en los experimentos mentales (Brown, 2013).

que se *descubren* tan sólo imaginando una experiencia. Pero, ¿qué tanta diferencia existe entre un experimento real y uno imaginario? Hopp (2014: 246, 261) defiende la idea de que un experimento mental puede ser tan genuino como uno real, capaz de proveer nuevo conocimiento, a través de un proceso de realización epistémica. En realidad, esta cuestión sería todo un tema aparte, pero por la relevancia que el asunto tiene en la tipología que propondremos sobre las paradojas, queremos sugerir, siguiendo a Hopp que tal vez la diferencia no es mucha. Además, desde otro punto de vista, así como veíamos anteriormente que hay quienes sostienen que un experimento imaginario no proporciona información nueva sobre el mundo, también, del lado de los constructivistas sociales, hay quienes sostienen que tampoco el experimento real lo hace. Harry Collins (1992) acuñó la expresión “regreso del experimentador”, con la cual pone en duda la fiabilidad epistémica de los resultados que arrojan los experimentos, frente a la circularidad que puede caracterizar al proceso,⁸ misma que al final debe de ser superada por “negociación social” entre los científicos. Ferreiros y Ordóñez, alejándose de dicha interpretación relativista de la generación del conocimiento y promoviendo una autonomía de la experimentación, sugieren que “es posible romper un círculo para convertirlo en hélice” (2002: 75), en la que si bien hay un grado de regresión, no se retorna exactamente al mismo punto y señala un progreso de conocimiento.⁹ En un experimento imaginario podríamos encontrar esta misma forma de progreso si atendemos a las tesis de Kuhn, Brown, Gandler o Hopp. En los ejemplos que ofrecemos en una sección posterior defenderemos estas posiciones.

UNA TIPOLOGÍA PARA LAS PARADOJAS EN LAS CIENCIAS FÍSICAS

La paradoja se presenta como un enigma que desafía la razón. En física, de forma particular, nos anuncia una aparente contradicción o falta de consistencia en la descripción de la realidad física y apunta por lo tanto hacia

⁸ El “regreso del experimentador” se puede interpretar en el sentido de que, por un lado, lo que los científicos consideran como un resultado correcto es aquel que se obtiene con un buen aparato experimental, es decir que funciona apropiadamente, y por el otro lado, un buen aparato experimental es aquel que da resultados correctos (Franklin, 2009).

⁹ Ferreiros y Ordóñez lo explican diciendo que: “Los procesos de formación de datos no son automáticos ni instantáneos” y que los procesos de investigación están en realidad “integrados por series de experimentos” (2002: 78) y lo ejemplifica con el caso de los experimentos ópticos con prismas de Newton.

una deficiencia ya sea en la teoría, en la observación experimental, en un escenario imaginado, o en el simple sentido común. Nos proponemos en esta sección y en la siguiente analizar de manera más puntual el papel de las paradojas al interior de esos cuatro elementos.

Como recurso de análisis y para fines de distinción creemos conveniente proponer una tipología para las paradojas en física que resulte acorde con la visión del cambio científico de Lakatos.¹⁰ Como primera clasificación con cuatro vertientes, diferenciamos entre 1) el conflicto directo con el experimento real; 2) el conflicto que surge de manera franca con la consistencia lógica de un aparato conceptual muy específico; 3) el que resulta de la relación y las posibles inconsistencias entre teorías en principio independientes en la física y, finalmente; 4) el conflicto con el sentido común.

Adicionalmente conviene señalar que en cada uno de esos casos, en el proceso deliberativo del científico, encontramos dos posibles actitudes: primero, que la paradoja no se resuelve, simplemente se acepta y se utiliza constructivamente; o bien, se incentiva un cambio conceptual que solventa o disuelva la paradoja.

A continuación ofrecemos la propuesta de manera directa y concisa que, en sección posterior, se ejemplificará para los tres primeros casos con la labor de Paul Ehrenfest, como modelo de científico fascinado por las paradojas al interior de su disciplina.

La primera categoría que proponemos consiste, por lo tanto, en una falta de concordancia entre lo que apunta el esquema teórico y la información que ofrece la naturaleza a nuestros sentidos e instrumentos en la experimentación. En términos de Lakatos estaríamos hablando de la presencia de una anomalía, un fenómeno que no ha sido asimilado por el programa de investigación en curso y que puede abordarse a través de hipótesis auxiliares del cinturón protector, o bien, dar lugar a un revolución conceptual más profunda.

Dentro de esta categoría sugerimos un segundo nivel de diferenciación: por un lado cuando hablamos de información empírica disponible, ya sea que dicha información se conozca con anticipación o se tenga forma de obtenerla con los recursos observacionales o tecno-

¹⁰ El trabajo de Laudan (1978) también puede ser considerado fuente de nuestras reflexiones. Este autor, por ejemplo, presenta una clasificación de tipos de problemas empíricos y conceptuales que enfrenta la ciencia. Parte de nuestra tipología tiene relación con dicha clasificación pero es reorientada en función de la “paradoja” que aquí manejamos y es ejemplificada ampliamente de manera distinta a como lo hace Laudan.

lógicos a la mano; y por otro lado, cuando nos referimos a información empírica esperada, pero para la cual no existen aún los medios tecnológicos para llegar a ella.

La segunda categoría corresponde a una contradicción teórica interna. En el esquema de Lakatos, significaría un problema con el núcleo duro del programa de investigación, independientemente de la referencia empírica real, aunque sí puede estar relacionada con la presencia de escenarios imaginarios que resultan inconsistentes.

En física, como ocurre también en otras disciplinas, suele hacerse referencias a diferentes aproximaciones teóricas que buscarían complementarse, pero que de igual forma pueden resultar incompatibles. A las contradicciones encontradas en este contexto las ubicamos en la tercera categoría. Aquí el enfoque que sugerimos, a través de la visión de Lakatos, será desde la perspectiva de considerar cada una de esas aproximaciones teóricas como diferentes programas de investigación¹¹ que no son necesariamente competitivos y en donde cabe la posibilidad de que sean complementarios o bien de que uno abarque al otro. En este caso la actitud de aceptar la paradoja conlleva una aceptación pacífica entre las diferentes teorías, en tanto que la resolución de la paradoja llevaría a un enfrentamiento entre las mismas cuyo resultado podría ser la desaparición de una de ellas, la asimilación de una por la otra o el punto de partida para nuevos esquemas conceptuales.

Por último, tendríamos la paradoja que aparece como conflicto con el sentido común. En este caso no hay nada que resolver, la paradoja es solo aparente y requiere solo de un proceso de convencimiento de que la evidencia con la que se cuenta es suficiente. Puede ocurrir porque las condiciones de la experiencia cotidiana se alejan de las idealizadas teóricamente, como sería la de la experiencia normal de que todo cuerpo tiende a un estado de reposo, o bien cuando se hace alusión a una realidad lejana a dicha experiencia cotidiana. Esto último sucedió fundamentalmente en la revolución de la física de las primeras décadas del siglo XX en el contexto de la teoría de la relatividad (funcionamiento de la realidad a velocidades altas) y de la mecánica cuántica (funcionamiento de la realidad a escala microscópica). Edgar Morin nos sintetiza el cambio de paradigma que cree vislumbrar

de la siguiente manera:

En la visión clásica, cuando una contradicción aparecía en un razonamiento, era una señal de error. Significaba dar marcha atrás y emprender otro razonamiento. Pero en la visión compleja, cuando se llega por vías empírico-racionales a contradicciones, ello no significa un error sino el hallazgo de una capa profunda de la realidad que, justamente porque es profunda, no puede ser traducida a nuestra lógica. (Morin, 2007 [1990]: 100)

Estos últimos casos significarían un reconocimiento de la existencia de realidades físicas que no podemos experimentar de manera directa con nuestros sentidos y que por lo tanto pueden crear aparentes contradicciones, pero que al final, a la luz de nuevas formas de entendimiento, no lo son.

PAUL EHRENFEST Y LAS PARADOJAS COMO RECURSO CRÍTICO DE SU DISCIPLINA

Empecemos con una caracterización del científico que hemos tomado como ejemplo. Paul Ehrenfest (1880-1933) influyó de muy diversas maneras en su disciplina, la física, a la que se dedicó con verdadera pasión. Martin Klein (1981: 3) nos hace un retrato fugaz de la contribución de Ehrenfest a la física basándose en una cita de Maxwell¹² que intenta mostrar a la ciencia como algo vivo en la que no sólo un descubrimiento, sino también la identificación de una paradoja o el uso de una frase científica o la exposición integradora de una teoría, son parte de la dinámica y la construcción de la misma. Paul Ehrenfest descubrió lo que más tarde Einstein llamó el principio adiabático, jugó con infinidad de paradojas,¹³ acuñó el término *catástrofe del ultravioleta*, que con tanto tino

¹² La cita textual de Maxwell dice: "It is not by discoveries only, and the registration of them by learned societies, that science is advanced. The true seat of science is not in the volume of transactions, but in the living mind, and the advancement of science consists in the direction of men's minds into a scientific channel; whether this is done by the announcement of a discovery, the assertion of a paradox, the invention of a scientific phrase, or the exposition of a system of doctrine" (Klein, 1981: 3).

¹³ De los trabajos científicos de Ehrenfest, varios de ellos están centrados en la presentación, formulación o identificación de alguna paradoja resultante dentro de los esquemas teóricos aceptados hasta ese momento dentro de la disciplina de la física (1959: 128, 136, 146, 154, 161, 303, 410, 479, 539). La referencia indicada corresponde a los "Collected Scientific Papers" de Paul Ehrenfest editados por Martin Klein. Aquí haremos referencia a algunos de esos artículos en las siguientes subsecciones en donde daremos las referencias originales.

¹¹ Existe desde luego un segundo enfoque que consistiría en considerar toda la física como un solo programa de investigación en cuyo caso estaríamos hablando de un caso especial de nuestra segunda categoría, pero nos parece pertinente considerarlo como una situación diferente.

exponía una de las limitaciones explicativas de la física clásica, y expuso con maestría, junto con su esposa Tatiana, el estado de la cuestión en que se encontraba la mecánica estadística en la primera década del siglo XX, en un tratado que se convirtió en un clásico y en una referencia obligada para los estudiosos de esa disciplina.

Durante los años en que Ehrenfest fue estudiante, nuevos y sorprendentes desafíos estaban surgiendo en la física. Encontramos, entre otros, el problema de la interacción entre materia y radiación —particularmente el asunto de la radiación de cuerpo negro—, el rompecabezas de los espectros atómicos y moleculares, la teoría del electrón, los rayos X, los fenómenos de radiactividad natural, etc. Estos nuevos fenómenos, aunados al contexto intelectual, cultural, social y político del momento, fueron el caldo de cultivo de una revolución donde la física sufrió una transformación tan o más radical y significativa que la que había ocurrido con científicos como Galileo y Newton, y con la que se develaría una nueva forma de entender el mundo y de actuar sobre él, inaugurando nuevas formas de relación más estrechas entre la ciencia y la tecnología. Paul Ehrenfest estuvo situado “en el centro del drama de la física contemporánea”, según lo caracterizó Paul Langevin después de su muerte en 1933 (Klein, 1981: 3).

En sus años de madurez, Ehrenfest se convirtió en punto de enlace importante en la red de científicos. Fue muy apreciado por su talento para la discusión y el debate. Aprovechaba cualquier oportunidad para señalar los puntos débiles, las falacias y las paradojas de un concepto o teoría, y sus publicaciones fueron siempre dirigidas hacia los fundamentos de la física. Su capacidad crítica fue reconocida por la comunidad científica y su trabajo tuvo gran impacto en el surgimiento de la teoría cuántica. A pesar de eso, Ehrenfest sufrió de baja autoestima en relación con su trabajo, en tanto se consideró incapaz de desarrollar de manera profunda una línea de pensamiento. Este sentimiento acompañó a Ehrenfest incluso ya en una etapa muy madura como físico teórico y en repetidas ocasiones lo expresaba con sus amigos. Por ejemplo, en cartas dirigidas a Einstein con motivo de una visita de éste a la Universidad de Leiden (donde trabajaba Ehrenfest), dijo: “estoy muy, muy deprimido, en parte debido a las eternas preocupaciones (¡¡¡menores!!!) de dinero, en parte, porque no estoy haciendo nada de trabajo. Lo que puedo hacer, no es ciencia, sino sólo un

poco de conversación de entretenimiento de salón o de pasillo acerca de la física, la física hecha por otros” (carta de Ehrenfest a Einstein, 6 de agosto de 1920, en Klein, 1985: 319); y en su relación con quienes él consideraba “grandes”, decía sentirse como “una inocua e indefensa rana temerosa de ser aplastada” (Carta de Ehrenfest a Einstein, 16 de agosto de 1920, en Klein, 1985: 319). Pero eso sí, se sentía sumamente atraído por las paradojas que presentaba en esa época el desarrollo de la física teórica, y lo apasionaba ocuparse de ellas, contribuyendo a promover un espíritu crítico y reflexivo en su disciplina.

Por esa razón, hemos escogido a este importante miembro de la comunidad científica de ese crucial período histórico de la física, para ilustrar nuestros puntos de vista en torno al uso de las paradojas en su disciplina y la tipología que hemos propuesto.

Paul Ehrenfest y el conflicto entre teoría y experimento: el caso del éter

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), 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” (Zajonc, 1996: 149). 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 cual se podría prescindir.

En una conferencia que ofreció en el año 1900, Boltzmann 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” (Boltzmann, 1986: 170). A principios del siglo XIX, cuando la hipótesis del éter se encontraba en una encrucijada, Paul Ehrenfest abordaba en su conferencia inaugural como profesor de física en Leiden, en 1912, algunas de las dificultades y paradojas

que enfrentaba la física en relación con ese concepto.

El núcleo de la argumentación de Ehrenfest se basa en un experimento imaginario que introduce con el objeto de mostrar los conflictos, 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. Despues 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 despues 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 tambien, 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 tambien 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 (Ehrenfest, 1959: 306-307).¹⁴

Para Ehrenfest, su experimento es en realidad una versión grotesca de un experimento real, el realizado en 1887 por Michelson y Morley, pero que le permite presen-

tar de una manera más vívida la controversia que suscitan los resultados “negativos” de dicho experimento. Según explicábamos previamente, siguiendo las ideas de Kuhn, para que un experimento imaginario resulte exitoso como fuente de nuevo conocimiento, debe de partir de un conjunto de supuestos que se ajusten al aparato conceptual previo del científico. 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” (Ehrenfest, 1959: 308-309). Sin embargo, siguiendo de nuevo las ideas de Kuhn (1982: 287), tendríamos que decir que 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”. El experimento mental es una herramienta en el proceso de las revoluciones científicas para que lo que se conocía de 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 enfrentando primero las teorías de Fresnel (que asumen un éter rígido) y las de Stokes (que consideran que el éter es “arrastrado” por los cuerpos en movimiento) y buscando posteriormente una salida a la crisis en las nuevas teorías (en particular se refiere a la de Einstein y a la de Ritz) que proponen prescindir del concepto del éter. A la pregunta planteada en el experimento mental (¿ve el experimentador en la esfera en movimiento tambien alumbrarse toda la superficie interna en el mismo instante o ve otra cosa?), nos dice Ehrenfest que Stokes respondería 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:

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),

¹⁴ La transcripción completa de la conferencia se encuentra en los “Collected Scientific Papers” de Paul Ehrenfest mencionados en la nota 11. La traducción del alemán al español es nuestra.

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 (Ehrenfest, 1959: 308).

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” (Ehrenfest, 1959: 309-310).

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 Lakatos. 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.

Después de enfrentar las teorías rivales considerando observaciones y experiencias previas, así como otras esperadas en escenarios imaginarios, sacando a la luz las paradojas involucradas, 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?” (Ehrenfest, 1959: 312). Después de relatar cómo las mediciones de aberración de la luz estelar y los experimentos de Fizeau hicieron que los físicos se decidieran por la teoría del éter rígido, Ehrenfest nos conduce al momento de la crisis haciendo-nos regresar a su experimento imaginario y explicar que en cierto sentido “Michelson ha ejecutado directamente nuestro experimento de la esfera” (Ehrenfest, 1959: 315) pero con un aparato de unos cuantos metros de extensión, y no encontró ningún retraso que correspondiera a la iluminación desigual de nuestra esfera. Presentando la nuevas propuestas de Einstein y de Ritz, que prometen superar la crisis, Ehrenfest termina su conferencia con una rápida referencia “al conjunto confuso de pro-

blemas, que se resume actualmente bajo la expresión ‘cuanto de luz’” (Ehrenfest, 1959: 323), 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 interesante están por venir en el desarrollo de la física.

De esta manera observamos un interesante juego de experimentos reales e imaginarios que sacan a la luz las paradojas implicadas y como éstas permiten dilucidar posibles salidas. En cuanto a la actitud con que el científico enfrente las paradojas, podemos decir que la de aceptación de la paradoja (que en este caso aparece en las diferentes respuestas que ofrecen las teorías de Fresnel y Stokes) incentiva un progreso teórico dentro de un mismo programa de investigación (en este caso formas diferentes de entender y conceptualizar el éter dentro del paradigma mecánico) y que después evoluciona hacia la otra forma de actitud que lleva a un cambio conceptual (el rechazo de la hipótesis del éter) a favor de nuevas teorías. En la nueva teoría de Einstein, el presupuesto, o la nueva creencia, no será que existe una condición de reposo privilegiada, sino que la velocidad de la luz tiene el mismo valor para cualquier observador.

Paul Ehrenfest y la rotación de un cuerpo rígido

Aunque Paul Ehrenfest se sintió atraído por el análisis de muchas paradojas, hay una en particular que lleva su nombre, es decir, que es conocida en el medio científico como “la paradoja de Ehrenfest” y que nos sirve para ilustrar el caso 2 de nuestra tipología concerniente a un aparente conflicto conceptual al interior de una teoría, en este caso, la teoría de la relatividad. Es un caso interesante que, hasta la fecha, ha sido interpretado de diversas maneras en revistas especializadas de la disciplina. Lo expondremos de manera breve.

La paradoja tiene que ver con la combinación de dos conceptos: el de cuerpos rígidos y el de contracción espacial, previsto por la teoría de la relatividad. Por un lado la noción normal de un cuerpo rígido en mecánica clásica, sería la de aquel que no sufre deformaciones por efectos externos (la distancia entre dos puntos del cuerpo es siempre la misma). Como la teoría especial de la relatividad predice contracciones espaciales en la dirección del movimiento, se requiere otra definición de cuerpo rígido. Ésta fue provista por Max Born basándose

en una propiedad de distancia constante local.

Ehrenfest mostró que aún la definición de rigidez de Born lleva a contradicciones al considerar el caso de un cilindro de radio R y altura H en rotación constante sobre su eje. El nuevo radio R' , nos dice Ehrenfest:

tendría que satisfacer dos exigencias contradictorias:

- a) En la periferia del cilindro debe de verse una contracción en comparación con el estado de reposo:

$$2\pi R' < 2\pi R$$

ya que cada elemento de la periferia se mueve en su propia dirección con la velocidad $R'\omega$.

- b) Si tenemos en cuenta cualquier elemento a lo largo del radio, su velocidad instantánea es normal a su extensión, por lo que el radio no debe de tener contracción en comparación con su situación de reposo. Debe ser $R' = R$.
(1909: 918)

La noción de rigidez de Born resulta entonces incompatible con la relatividad especial sin que a la fecha exista consenso en torno a la forma de resolver la paradoja, de manera que aparece como un caso de aceptación de la paradoja por parte de la comunidad científica y de reconocer que, después de todo, los modelos son incapaces de aprehender la realidad en toda su complejidad.

Paul Ehrenfest y las paradojas de Loschmidt y Zermelo

Hacia finales del siglo XIX tres grandes esquemas conceptuales luchaban por ser la base de la explicación física del mundo: el *mecanicismo*, el *electromagnetismo* y la *termodinámica*, cada uno de ellos con sus promotores y sus detractores. El tema que queremos abordar en esta sección atiende al surgimiento de la mecánica estadística, como eslabón entre las ciencias que se ocupan del mundo macroscópico y que lo tratan como continuo — como es el caso de la termodinámica — y las ciencias que se ocupan del mundo microscópico y reconocen a la naturaleza como compuesta de partículas discretas sujetas a leyes mecánicas. El desarrollo de esta disciplina constituyó un gran triunfo de científicos del siglo XIX como Clausius, Maxwell y, de manera muy especial, Boltzmann, quien vio en el concepto termodinámico de la entropía una medida del desorden, haciendo de la

segunda ley de la termodinámica una expresión directa de las leyes de la probabilidad. La disminución de la entropía ya no era una prohibición dentro de las leyes físicas sino simplemente un evento improbable, dependiente de las condiciones iniciales del sistema. Los problemas epistemológicos que esta situación presentó no se pueden soslayar, pues a pesar de reconocer la acción de leyes mecánicas determinísticas, al final se advierte el carácter más débil, probabilístico, de la descripción macroscópica de un sistema compuesto por una multitud de partículas microscópicas. Paradojas, al fin, que surgen de dos formas de mirar al mundo, de dos programas de investigación consolidados pero que, en su interacción dan lugar a nuevas interpretaciones y que nos permiten ilustrar el tercer caso en nuestra tipología de paradojas.

Después del desarrollo de la mecánica estadística en el siglo XIX y ante la crisis de las ciencias físicas a principios del siglo XX, la presencia de científicos críticos de su propia disciplina resultó muy importante. Uno de estos científicos es Paul Ehrenfest, quien como discípulo de Boltzmann tuvo un gran interés en la mecánica estadística. En este apartado nos proponemos mostrar la perspectiva crítica de Paul Ehrenfest y su esposa Tatiana y de sus aportaciones en torno a dicha ciencia en los primeros años del siglo XX, atendiendo de manera especial a las paradojas y controversias que generó.

La mecánica estadística no es sólo una *reducción* de la termodinámica basada en la mecánica Newtoniana y la visión atomista de la materia, como resulta claro de las paradojas conceptuales que se fueron presentando en el curso de su desarrollo. En todo caso, la mecánica estadística es una *extensión* de la termodinámica que adopta criterios probabilísticos de los cuales surgen nuevas connotaciones epistemológicas, nuevas preguntas sobre lo que podemos conocer y cuáles son los fundamentos de ese conocimiento. Los conceptos probabilísticos que se aplican no son sólo en el sentido de utilizar valores promedio de cantidades físicas asociadas a las partículas (velocidad, energía, etcétera), que podríamos catalogar también como un concepto mecánico, sino en un sentido más fundamental ligado a ideas de aleatoriedad, posibilidad, etc. De entrada, para establecer una clara distinción, es importante entender que cuando hablamos de la física cuántica, las probabilidades aparecen como parte de la indeterminación o al menos la falta de determinismo estricto que caracteriza a esa teoría, pero

cuando hablamos de la física clásica, se supone que hablamos de una teoría totalmente determinista cuyas leyes en principio permiten conocer completamente el futuro. Por eso, en este caso, el uso de conceptos probabilísticos resulta más desconcertante (Guttmann, 1999: 1). En esa extraña mezcla de mecánica y estadística, para deducir propiedades macroscópicas, se empieza con las leyes de Newton, pero en el proceso se tienen que introducir nuevos supuestos (por ejemplo, que los átomos o moléculas están distribuidos uniformemente o que tienen la misma probabilidad de moverse en cualquier dirección) que a pesar de ser probabilísticos, se establecen como datos *a priori*. Por lo tanto, no queda claro si la introducción de esos nuevos elementos resulta consistente o justificada bajo la base de la aplicación de la mecánica newtoniana. El debate sobre la existencia de los átomos y sobre la justificación o no de combinar principios determinísticos y probabilísticos pone a estas nuevas formas de desarrollo de la física en una situación muy delicada y vulnerable.

Boltzmann mostró, al definir el equivalente mecánico del concepto “entropía”, que un gas en un estado inicial arbitrario llegaría a un estado de equilibrio de máxima entropía, como resultado de las colisiones de sus moléculas. Josef Loschmidt, un colega de Boltzmann, introdujo en 1876 un sencillo pero poderoso argumento que ponía en entredicho el edificio en el que se construía la mecánica estadística. Si tenemos un sistema que evoluciona hacia su máxima entropía, ¿qué pasaría si en un momento dado detenemos el sistema, e invertimos las velocidades de todas las moléculas? En virtud del carácter simétrico en el tiempo de las leyes de la mecánica (si en las ecuaciones se cambia t por $-t$ se obtiene el proceso inverso, o sea que estas leyes no proporcionan un sentido del tiempo), el sistema volvería a su estado original, es decir, evolucionaría hacia una disminución de la entropía, siendo que la termodinámica nos dice que la entropía siempre aumenta. Los Ehrenfest bautizaron a esta contradicción como “la paradoja de la reversibilidad”. Boltzmann no sólo dio varios argumentos para defenderse de este ataque, sino que se vio motivado por la paradoja para explorar otros conceptos.

Otra objeción a los trabajos de Boltzmann se basa en un teorema de Poincaré que establece que para ciertos sistemas dinámicos en los que se conserva la energía, necesariamente, si se le deja evolucionar por tiempo

indefinido, regresará un número indeterminado de veces a estados tan cercanos como se quiera a las condiciones iniciales de las cuales había partido el sistema. Zermelo, alumno de Poincaré, hizo notar en 1896 que esto resultaba en clara contradicción con la segunda ley de la termodinámica. A esto se le llamó “paradoja de la recurrencia”, de lo cual como veremos más adelante, también se ocuparon los Ehrenfest.

En un curso sobre mecánica estadística que ofrecía Paul Ehrenfest en Leiden en el año escolar 1915-1916, les aconsejaba a sus alumnos: “Si es necesario, siempre traten de ilustrar usando modelos de dados o de urnas para evitar cualquier misticismo” (Klein, 1989: 32). Con esto evitarían que las suposiciones probabilísticas quedaran ocultas dentro de las ecuaciones que se derivaban a partir de los cálculos que involucraban los movimientos y colisiones de las partículas. Para Ehrenfest, el uso de modelos simples, como “caricatura” del problema real, permitía resaltar y exponer de una manera clara los aspectos más cruciales de los fenómenos estudiados, pues de esa manera, con pocos cálculos se podrían entrever las conexiones lógicas entre las suposiciones y los resultados que de otra forma quedarían escondidos en las ecuaciones. Una de sus lecciones tenía que ver con las objeciones (las de Loschmidt y Zermelo mencionadas anteriormente) que se habían levantado en contra de la interpretación que Boltzmann había dado de la segunda ley de la termodinámica. Como era su costumbre, el tema lo abordó por medio de un modelo simple de urnas que él y Tatiana habían ideado hacía algunos años y sobre el cual habían publicado dos artículos en 1906 y 1907 titulados *Über eine Aufgabe aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung, die mit der kinetischen Deutung der Entropievermehrung zusammenhängt* [Sobre una tarea del cálculo de probabilidades, en conexión con la interpretación cinética del incremento de entropía] y *Über zwei bekannte Einwände gegen das Boltzmannsche H-Theorem* [Sobre dos conocidas objeciones contra el teorema H de Boltzmann].

El modelo de urnas de Paul y Tatiana, que se hizo muy popular, surgió de los análisis que el joven matrimonio había discutido en torno a las citadas objeciones en un intento por clarificar las contradicciones que ahí se presentaban. El modelo ha sido discutido en detalle por otros autores, pero nosotros presentamos aquí nuestra traducción al español de la primera sección del artículo de 1906 para poder extraer algunas de las ideas que nos

interesan en este espacio. Se plantea en ese artículo lo siguiente:

Se nos dan N bolas (por ejemplo, 100). Las mismas son numeradas en forma consecutiva del 1 al N para poder distinguirlas individualmente. Se reparten inmediatamente en dos urnas, de tal manera que la urna A contenga P_o (por ejemplo 90) y la urna B tenga $Q_o = N - P_o$ (correspondientemente 10) bolas. Pero no se sabe qué bolas quedaron en A y cuáles en B. En una bolsa se encuentran N cartas de lotería numeradas del 1 al N . Cada 10 segundos se saca una carta, se anuncia su número, se regresa a la bolsa y se mezcla bien. Luego se escoge otra, se anuncia, etc. Cada vez que se anuncia un número, la bola que lleva ese número salta de la urna en la que se encuentra hacia la otra urna y permanece ahí hasta que más tarde vuelva a salir su número. Es claro que: siempre es más probable que la bola escogida se encontrará en la urna más llena y no en la más vacía. Por lo tanto, en tanto que la urna A siga estando mucho más llena que la urna B, la mayoría de los siguientes resultados del sorteo vaciarán la urna A en la urna B y sólo rara vez sacarán una bola de la urna B (Ehrenfest y Ehrenfest–Afanasy-eva 1906).¹⁵

Los Ehrenfest introducen una cantidad y definida como la diferencia absoluta entre el número de bolas que se encuentran en las urnas y analizan su comportamiento. Esta cantidad, vendría siendo equivalente a la función H de Boltzmann.¹⁶ Aunque la “curva” que representa a y tiende hacia un valor nulo, nada impide que, si se espera un tiempo suficientemente grande pueda crecer incluso hasta un valor N , correspondiente al vaciado de una de las urnas. Con este modelo, desarrollado luego con más detalle en el artículo de 1907, los Ehrenfest tratan de dar respuesta a las objeciones presentadas por Loschmidt y

¹⁵ El modelo ilustraría de una manera bastante directa el caso, por ejemplo, de un gas confinado en un receptáculo con un volumen dado dividido en dos por una barrera con una abertura. Si partimos de una condición inicial en la que la densidad de las dos mitades es diferente, las moléculas podrían pasar a través de la abertura de un lado a otro tiendiendo a igualar la densidad. El modelo llegó a ser llamado también “modelo de los perros y las pulgas”, al sustituir las urnas por dos perros y las bolas por pulgas que saltan de un perro al otro.

¹⁶ La función H (llamada E por Boltzmann) se define como $H = f \log f$, siendo f la función de distribución de velocidades. Boltzmann había demostrado que H siempre disminuye a menos que f sea la distribución de Maxwell. Si identificamos a $-H$ como la entropía, resulta claro que dicha entropía irá en aumento hasta que el conjunto de moléculas de gas adquiere la distribución de velocidades de Maxwell.

Zermelo en el sentido de que el aumento de la entropía no es una ley absoluta, sino que es de carácter estadístico.¹⁷ Este último artículo se desarrolla en un estilo muy distintivo de Paul Ehrenfest que consiste en presentar secuencialmente los puntos que quiere mostrar, comparar o deducir lógicamente. En este caso: 1) El teorema H en su formulación usual; 2) la objeción de reversibilidad de Loschmidt; 3) la objeción de recurrencia de Zermelo; 4) el punto de vista de Boltzmann en relación con estas dos objeciones; 5) las contradicciones; 6) su modelo que clarificará el asunto; y, 7) comentarios finales en donde concluye que “ni la objeción de reversibilidad, ni tampoco la objeción de recurrencia son de ningún modo apropiadas o suficientes para desaprobar la afirmación de Boltzmann de que el cociente diferencial temporal de H es, con enorme probabilidad, negativo para valores grandes de H ” (Ehrenfest y Ehrenfest–Afanasy-eva T., 1907: 149). Un punto especialmente interesante que los Ehrenfest hacen notar es que en su modelo resulta claro que dado un valor grande de y (o de H), la “curva”, como regla general, tiende a decrecer, y sólo de vez en cuando progresá hacia arriba, pero lo más importante, “este enunciado aplica tanto si uno recorre la curva de izquierda a derecha o de derecha a izquierda” (Ehrenfest y Ehrenfest–Afanasy-eva, 1907: 148). Es decir, hay una simetría en el tiempo con lo cual se responde a la objeción de reversibilidad (dada por las ecuaciones de la mecánica), pero a la vez se verifica la afirmación de Boltzmann de la tendencia de H a disminuir.

Constatamos en este ejemplo dos aspectos importantes. En primer lugar, la idea de que *simplificar* es un recurso que nos permite visualizar de manera diáfana las contradicciones implicadas y dar luz para comprender el aspecto de la realidad que se está analizando y que además proporciona elementos de justificación para nuevas creencias, en este caso, en particular relativas a la función de las probabilidades en la explicación física del mundo. En segundo lugar, señalaríamos la actitud de buscar la conciliación entre puntos de vista provenientes de programas de investigación diferentes.

La actitud de los Ehrenfest en estos temas fue en todo momento crítica, atenta a las dificultades y a las paradojas que se presentaban, otorgándole un gran valor a la continua discusión de los puntos cruciales como cons-

¹⁷ En este artículo es en el que los Ehrenfest bautizan a estas objeciones con los nombres de reversibilidad (*Umkehrreinwand*) y recurrencia (*Wiederkehrreinwand*).

tituyente principal de la vida y la actividad científica. Esta forma de actuar les valió el respeto de la comunidad científica. En particular, un notable matemático de su tiempo, Félix Klein, los invitó a escribir una colaboración para la *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften*, donde hicieron una revisión de los principios de la mecánica estadística, la cual se convirtió en una referencia obligada para físicos y matemáticos.

En las conclusiones del artículo que hemos analizado, sus autores dejan ver la importancia de los últimos hitos en su disciplina —el estudio del movimiento de los electrones en los metales, las investigaciones sobre soluciones coloidales— y cómo estos asuntos fueron responsables del renovado interés por las ideas de Boltzmann y por su fe en el uso de imágenes mecánicas y atomísticas, pues dichas aplicaciones “han tenido el efecto de revivir y profundizar el concepto de que todos los cuerpos pueden visualizarse como agregados de un número finito de componentes elementales idénticos y muy pequeños” (Ehrenfest y Ehrenfest-Afanasyeva 1959 [1912]: 68). Sin embargo, reconocen que la situación es más complicada en las aplicaciones a los fenómenos de radiación, donde

el teorema de equipartición de energía extendido al equilibrio térmico entre la materia y el éter estaba bien confirmado en lo que se refiere a la parte infrarroja de la radiación del cuerpo negro [...] sin embargo, su extensión al dominio ultravioleta lleva a resultados absurdos, de tal manera que [...] hasta el momento nadie sabe cómo se pueden resolver estas dificultades (Ehrenfest y Ehrenfest-Afanasyeva 1959 [1912]: 69).

El mismo año —1911— en que escribía lo anterior, Ehrenfest bautizaría esos resultados absurdos como la “catastrofe ultravioleta” y significarían el camino hacia la física cuántica.

CONCLUSIÓN

La exposición que aquí hemos ofrecido estuvo motivada principalmente por el pensamiento y el trabajo de Lakatos y de Ehrenfest. Por un lado, tenemos el pensamiento de un filósofo de la ciencia que tuvo el tino de presentar una visión del cambio científico coherente y, según nuestro juicio, suficientemente apegado a como ocurren

realmente las cosas en las actividad científica. Por otro lado, tenemos a un físico que, si bien no tiene el reconocimiento de Einstein o de Bohr, sí se caracterizó por poseer un compromiso total hacia su disciplina y hacia sus colegas y siempre se preocupó por la coherencia y la inteligibilidad de la física en momentos de cambios revolucionarios, esfuerzo que se tradujo en una atención especial a las paradojas que surgían en su disciplina.

De esta manera, tomamos prestada de Lakatos la particular visión del devenir científico, y de Ehrenfest, ejemplos espectaculares de análisis y de visión crítica de su disciplina para construir una tipología de las paradojas en las ciencias físicas que, si bien se alimenta de otras fuentes, enriquece la reflexión en torno al tema y busca ofrecer una herramienta para pensarlas.

REFERENCIAS

- Boltzmann, L. (1986). *Escritos de mecánica y termodinámica*. Trad. Javier Ordóñez. Madrid: Alianza Editorial.
- Brown, J. (2004). Peeking into Plato’s Heaven. *Philosophy of Science*, 71, 1126-1138.
- _____ (2011). *The Laboratory of the Mind: Thought Experiments in the Natural Sciences*. Nueva York: Routledge.
- _____ (2013). What do We See in a Thought Experiment? En M. Frappier, L. Meynell y J. Brown (Eds.). *Thought Experiments in Philosophy, Science, and the Arts* (pp.). Nueva York: Routledge.
- Collins, H. (1992). *Changing Order: Replication and Induction on Scientific Papers*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Ehrenfest, P. (1909). “Gleichförmige Rotation starrer Körper und Relativitätstheorie”, *Phys. Zeitschrift*, 10, 918.
- _____ (1959). *Collected Scientific Papers*. M. J. Klein, editor. Ámsterdam: North-Holland Publishing Company
- Ehrenfest, P. y Ehrenfest-Afanasyeva, T. (1906). “Über eine Aufgabe aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung, die mit der kinetischen Deutung der Entropievermehrung zusammenhängt”. *Mathematisch Naturwissenschaftliche Blätter*, 3.
- _____ (1907). “Über zwei bekannte Einwände gegen das Boltzmannsche H-Theorem”,

- Physikalische Zeitschrift*, 8(9), 311-314.
- _____ (1959) [1912]. *The Conceptual Foundations of the Statistical Approach in Mechanics*. Trad. Michael J. Moravcsik. New York: Dover Publications.
- Ferreiros, J. y Ordóñez, J. (2002). Hacia una filosofía de la experimentación. *Crítica: Revista Hispanoamericana de Filosofía*, 34 (102), 47-86.
- Franklin, A. (2009). Experiment in Physics. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Recuperado de <http://plato.stanford.edu/entries/physics-experiment/#AL>, consultado el 12 de febrero de 2014.
- Galilei, G. (2003). *Diálogos acerca de las nuevas ciencias*. Buenos Aires: Losada.
- Gendler, T. (2004). Thought Experiments Rethought – and Reperceived. *Philosophy of Science*, 71, 1152-1164.
- Guttmann, Y. (1999). *The Concept of Probability in Statistical Physics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hacking, I. (1996). *Representar e intervenir*. Trad. Sergio F. Martínez. México: Paidós- Instituto de Investigaciones Filosóficas de la UNAM.
- Hopp, W. (2014). Experiments in Thought. *Perspectives on Science*, 22 (2), 242-263.
- Klein, M. (1981). Not by discoveries alone: The centennial of Paul Ehrenfest. *Physica A (Elsevier)*, 106, 3-14.
- _____ (1985). *Paul Ehrenfest: The making of a theoretical physicist*. Ámsterdam: North-Holland Physics Publishing.
- _____ (1989). Physics in the Making in Leiden: Paul Ehrenfest as Teacher. En Sarlemijn, A. y Spaarnay, M. (Eds.), *Physics in the Making: Essays on Developments in 20th Century Physics* (pp.). Ámsterdam: North-Holland.
- Kuhn, T. S. (1971). *La estructura de las revoluciones científicas*. Trad. Agustín Contin. México: Fondo de Cultura Económica.
- _____ (1982). La función de los experimentos imaginarios. En *La tensión esencial* (pp.29-44). México: Fondo de Cultura Económica.
- Lakatos, I. (2002). *Escritos Filosóficos. 1. La metodología de los programas de investigación científica*. Trad. Juan Carlos Zapatero. Madrid: Alianza Editorial.
- Laudan, L. (1978). *Progress and Its Problems: Towards a Theory of Scientific Growth*. Los Ángeles: University of California Press.
- Machery, E. (2011). Thought experiments and philosophical knowledge. *Metaphilosophy*, 42 (3), 191-214.
- Morin, E. (1984). *Ciencia con conciencia*. Trad. Ana Sánchez. Barcelona: Anthropos.
- _____ (2007). *Introducción al Pensamiento Complejo*. Trad. Marcelo Pakman. Barcelona: Gedisa.
- Norton, J. (2004). On Thought Experiments: Is There More to the Argument? *Philosophy of Science*, 71, 1139-1151.
- Popper, K. (1991). *Conjeturas y refutaciones: el desarrollo del conocimiento científico*. Barcelona: Paidós.
- Zajonc, A. (1996). *Atrapando la luz: Historia de la luz y de la mente*. Trad. Carlos Gardini. Santiago de Chile: Andrés Bello.