

Introducción

Tal vez sea difícil justificar un trabajo como el presente, que trata sobre el periodo de crisis que sufrieron las ciencias físicas a principios del siglo XX, debido a la amplia literatura que hay sobre el tema. Sin embargo, las nuevas formas de abordar la historia de la ciencia van mucho más allá de una mera crónica, y la convierten en una empresa de naturaleza explicativa, donde un sinfín de perspectivas o dimensiones diversas (social, cultural, psicológica, personal, filosófica, etc.) pueden dar luz para comprender los desarrollos científicos. En este sentido, creemos que una contribución más a un tema ya ampliamente tratado no necesariamente resultará superflua, sino que puede representar un elemento explicativo adicional que, en suma con los demás, ofrezca un mayor entendimiento. Al acercarnos a un personaje, Paul Ehrenfest, que no aparece de manera relumbrante en las historias contadas, pero que parecía ofrecer aproximaciones interesantes al tema, nos convencimos de que adentrarnos en su estudio podría significar una contribución, si bien humilde, de todas maneras importante.

CAMPO DE ESTUDIO

1. La crisis de la física del siglo XIX

El trabajo de investigación que se presenta aquí tiene que ver con el periodo de transición ocurrido a principios del siglo XX en las ciencias físicas, de manera que es necesario tener en cuenta lo que prevalecía en el siglo anterior para poder ubicar nuestro campo de estudio.

A lo largo del siglo XIX, en la ciencia de la física predominó el programa de explicación mecánica de la naturaleza. Por supuesto, se reconocían diferentes manifestaciones fenoménicas como el calor, la electricidad, el magnetismo y la luz, pero con la aparición de la física de la energía se desarrolló un principio unificador que reducía todo fenómeno físico a materia en movimiento. Así, el calor se interpretaba como la vibración de partículas materiales, y la propagación de la luz, como vibración de una sustancia que llenaba todo el espacio, el llamado éter.

El propósito último de la física se reducía así a dar cuenta del movimiento continuo en el espacio de las partículas materiales, dada su interacción con el resto de las partículas. Detrás de esta tarea encontramos supuestos epistémicos que nos hablan de un mundo continuo y determinista en el que se suceden acontecimientos siguiendo una relación causal. Dadas las condiciones iniciales de posición y velocidad de las partículas, sería en principio posible predecir su estado futuro aplicando las leyes de interacción entre ellas.

Hacia finales del siglo XIX empezaron a surgir diferentes incompatibilidades en los distintos campos de la física. Por ejemplo, los datos aportados por la teoría cinética de los gases por un lado, y por la espectroscopia por el otro, no concordaban al momento de querer deducir características de la estructura molecular. Entre los diferentes esfuerzos realizados

para evitar el desmembramiento de la física surgió la mecánica estadística, a la cual podemos encontrar como uno de los antecedentes fundamentales de la física cuántica.

Además, no todos los científicos compartían este programa de explicación mecánica. Algunos realizaban esfuerzos por dotar a la física de una base fenomenológica (un tipo de positivismo) basada en correlaciones de observaciones más directas, evitando usar entidades «hipotéticas» como las partículas atómicas u otros mecanismos.

Todo esto nos habla de un periodo de crisis en las ciencias físicas, cuya salida tendría profundas interrelaciones con la cultura, las manifestaciones filosóficas y otras áreas del conocimiento. El resultado de este periodo de transición hacia una nueva física implicaría una visión del mundo enteramente nueva en la que se desecharían ideas tan fundamentales como el carácter determinístico y continuo del mundo físico que había prevalecido en el pasado.

2. La transición de la física clásica a la física cuántica

El surgimiento de la teoría cuántica antigua se asocia principalmente a los nombres de Planck y Einstein, con sus trabajos en torno al problema de la radiación del cuerpo negro y al efecto fotoeléctrico.

El problema de la radiación del cuerpo negro está ligado a la teoría cinética de los gases y la mecánica estadística, porque una forma de abordarlo era considerar el comportamiento de la radiación electromagnética en una cavidad como si fuera un gas perfecto en equilibrio con las paredes de su contenedor. Ahora bien, una de las leyes básicas de la mecánica estadística es el teorema de equipartición de energía que establece que la energía total contenida en un conjunto grande de partículas individuales que intercambian energía a través de sus colisiones se divide por

igual (en promedio) entre todas las partículas. Pero si se aplicaba esto a la radiación electromagnética (como lo hicieron Rayleigh y Jeans), asumiendo que toda la energía de radiación se distribuye por igual en todas las frecuencias, los resultados no concordaban con los experimentos. Fue Planck quien recurrió a nuevas ideas para encontrar la fórmula matemática correcta de la distribución de la radiación que se correspondía con la experiencia y justificarla después teóricamente introduciendo el cuanto de energía (paquetes de energía), lo cual para muchos representa el nacimiento de la revolución cuántica. Sin embargo, es importante mencionar que en esto hay controversia, pues algunos historiadores, como es el caso de Kuhn, sostienen una interpretación en el sentido de que Plank realmente no tenía en mente nada parecido a la cuantización.

Muy relacionado con los puntos anteriores tenemos el asunto del efecto fotoeléctrico. El primero en conocer el efecto (como una transformación de luz en electricidad) fue Lenard, quien notó que la fotocorriente es proporcional a la intensidad de la luz, que hay un potencial de corte, que la energía cinética de los electrones no era afectada por la intensidad y que la velocidad máxima dependía del tipo de luz (frecuencia). Estos experimentos fueron explicados por Einstein en un artículo publicado en 1905 en el que sugiere, sustentándolo teóricamente, que la radiación monocromática se comporta, en un sentido termodinámico, como si consistiera en cuantos de energía mutuamente independientes.

Todo esto nos habla del desarrollo, a principios del siglo XX, de nuevas formulaciones, detrás de las cuales hay una serie de elecciones radicales sobre el tipo de descripción de los fenómenos y las herramientas conceptuales utilizadas. Es probable que estas elecciones dependan no solamente de aspectos internos de la disciplina, sino de las relaciones con las necesidades técnicas, el entorno social, el contexto cultural, etc. Por ejemplo, los modelos basados en entidades no observables y el uso de he-

rramientas estadísticas se hacen ahora cada vez más necesarios para las nuevas tareas que se le exigen a la nueva ciencia.

Después de los trabajos de Planck y Einstein, en 1913 Niels Bohr aplicó la cuantización a la descripción de la energía mecánica de los electrones en un átomo partiendo del modelo planetario de Rutherford, el cual por un lado tenía bases experimentales muy sólidas, pero por otro presentaba claras contradicciones con la física clásica. Entre otras cosas, Bohr pudo explicar la posición de las líneas espectrales del hidrógeno, sentando las bases de un desarrollo científico sin precedentes que permitió comprender las propiedades de los elementos. Aun así, la teoría de Bohr resultaba claramente incompleta, pues fallaba en calcular, por ejemplo, las intensidades de las líneas espectrales mencionadas.

Faltaban aún otros caminos por recorrer para que quedara firmemente establecida la nueva mecánica cuántica. En 1925, Louis de Broglie dio una nueva interpretación de las órbitas cuánticas de Bohr que sirvió de fundamento para la teoría ya más completa de Erwin Schrödinger conocida como mecánica ondulatoria. Casi simultáneamente, Heisenberg desarrolló una forma equivalente de la teoría pero en forma de mecánica matricial que ofrecía los mismos resultados en lo que se refiere a la estructura atómica y sus espectros.

En la nueva física se renuncia de manera deliberada a los métodos explicativos de la física clásica, es decir, se hacen a un lado los principios de continuidad espacio-temporal de los fenómenos físicos y, sobre todo, se considera innecesaria la aceptación de una causalidad estricta de las leyes naturales. Algunos historiadores de la ciencia consideran que el tránsito hacia la nueva física está fuertemente ligado al ambiente sociocultural que dominaban en la época en donde tenían lugar estos desarrollos científicos. Paul Forman, por ejemplo, sostiene una tesis en el sentido de que en Alemania, durante la República de Weimar, se vivía un ambiente intelectual antirracionalista, neorromántico

y de clara repulsa hacia el mecanicismo y la causalidad, al cual tuvieron que adaptarse los físicos y matemáticos de la época, generando, como consecuencia, un movimiento entre estos científicos encaminado a abandonar el principio de causalidad.

Dentro del escenario que aquí hemos descrito, aparece Paul Ehrenfest viviendo de cerca y en carne propia todos los desarrollos de la física que aquí hemos reseñado, haciendo aportaciones importantes, criticando el rumbo de la disciplina, estableciendo relaciones importantes con físicos de la talla de Einstein o Bohr y, como todos ellos, viviendo bajo el influjo de una sociedad cambiante en las primeras décadas del siglo XX.

3. Paul Ehrenfest

Paul Ehrenfest fue uno de los científicos que participó en el desarrollo de la nueva física. Martin Klein y otros historiadores han escrito sobre él y su contribución, pero aún queda mucho por explorar en torno a este hombre singular. Ciertamente, lo poco que se conoce de él no hace justicia a la importancia de su contribución y a las claves que su historia científica y personal podrían aportar para comprender mejor algunos aspectos del surgimiento de la física moderna. Aunque ninguna gran teoría lleva su nombre, Paul Ehrenfest se sitúa justo en la confluencia de las ideas que definirían la nueva física y fue una de las personas más comprometidas en su desarrollo, como lo muestra el apelativo que le daban sus colegas de «la conciencia de la física».

Paul Ehrenfest es probablemente la mejor personificación del drama que tuvo lugar en la física. La gradual formulación de la física moderna, liderada por varios de sus amigos cercanos, lo llevó a la desesperación, la depresión y la autocrítica. Al final, tomaría la misma decisión que su maestro Boltz-

mann: el suicidio. En una carta escrita a sus mejores amigos, pero que nunca fue enviada, expresaba su estado de ánimo, su sentimiento de inutilidad y su decisión de quitarse la vida. Con Ehrenfest nos topamos con un personaje singular, un gran maestro, un crítico de su disciplina y sobre todo de sí mismo y cuya vida estuvo inextricablemente ligada a los temas cruciales de la física de principios del siglo XX.

El objetivo de este libro es ofrecer una perspectiva que profundice y aporte elementos nuevos para la comprensión del proceso de transición de la física clásica a la física cuántica siguiendo el desarrollo científico y personal de Paul Ehrenfest. A lo largo de la obra, se hará una reconstrucción de la manera en que Paul Ehrenfest recogió las nuevas ideas que iban surgiendo en la física, la forma en que las aceptaba o rechazaba y la manera en que él mismo señalaba y criticaba el rumbo que iba tomando la física a la vez que ofrecía sus propias aportaciones al debate científico.

INTENCIONES

Como ya hemos mencionado, por medio de este trabajo de investigación hemos querido dar una mirada particular a las ideas, conceptos y debates fundamentales que se dieron en el campo de la física a principios del siglo XX desde la perspectiva de un hombre con una personalidad muy especial, llamado Paul Ehrenfest, que se encontró siempre en el centro de los acontecimientos. Sin embargo, también queremos destacar que nuestra mirada tendrá, en varios momentos, ciertos sesgos que podemos caracterizar con las siguientes intenciones.

1. Contribuir a mostrar la ciencia como una aventura intelectual y una fuerza cultural, inmersa en una serie de presuposiciones temáticas, de imaginación creativa y di-

- versidad de retóricas a la par de su caracterización meramente empírica y lógica.
2. Enfatizar el carácter conflictivo y contingente del desarrollo científico, donde el «progreso» con frecuencia se ve entorpecido por concepciones mal encaminadas, pero en un momento dado capaces de abrir nuevos dominios de entendimiento.
 3. Mostrar el particular talante filosófico de que estaban dotados los físicos de esa época.

ESTRUCTURA DE LOS CONTENIDOS

Lo que desarrollaremos a lo largo de este libro no pretende ser un estudio exhaustivo de la vida y obra de Paul Ehrenfest. De hecho, el núcleo del estudio se centra en el periodo de 1904 a 1924, dentro del cual, además, solo se consideraron algunos trabajos de Ehrenfest especialmente seleccionados para poder cumplir con nuestro objetivo de darle una mirada a los temas cruciales de la física de esa época. Para explicar la manera en que está pensado y estructurado este trabajo es necesario explicar primeramente cuáles son esos temas capitales y de qué manera los queremos relacionar.

Los temas cruciales a los que nos referimos tienen que ver con las tensiones existentes en la tarea de explicación del mundo físico, con la manera en que surge de ahí la necesidad de nuevas concepciones y la forma en que se construyen puentes para entrar a un nuevo reino de entendimiento. El paradigma clásico dominante en el siglo XIX era la *mecánica*, que en buena medida funcionaba como medio de inteligibilidad de los fenómenos, dándoles una visualización espacio-temporal. El escenario sería dicho espacio-tiempo absoluto en el que las partículas materiales interactúan de acuerdo con ciertas leyes que es posible ir desvelando y con las cuales po-

demos predecir el movimiento de dichas partículas; en suma, un mundo determinístico y continuo. Adicionalmente al pensamiento mecánico podemos identificar dos líneas de pensamiento que habían resultado muy exitosas en el siglo XIX. Por un lado encontramos el *electromagnetismo*, que bajo el concepto de teoría de campos se refiere a estos últimos como entidades independientes de la materia, y que disputa con la mecánica la posibilidad de reducción última de explicación física del universo: ¿es la radiación una forma de vibración mecánica de un éter que lo llena todo o tiene una existencia independiente? Por otro lado encontramos la *termodinámica*, como ciencia del calor, como paradigma de explicación más fenomenológica, aplicable solo a variables macroscópicas (presión, volumen, temperatura —de un gas por ejemplo—), pero entrando en contacto con la mecánica a través de la mecánica estadística como forma de explicación de las variables termodinámicas en términos del comportamiento promedio de las partículas de un sistema. Las contradicciones y paradojas surgidas en el juego entre estas dos últimas concepciones, al aplicarlas a ciertos fenómenos, como el caso de la radiación del cuerpo negro, dieron lugar a nuevos paradigmas y a la construcción de puentes conceptuales para lograr su asimilación.

Antes de entrar propiamente a los temas cruciales de la física, en el capítulo 1 damos un panorama general de dicha disciplina en tiempos de Ehrenfest haciendo referencia a la crisis vivida, destacando las características que creemos importantes de la labor científica y su relación con el momento cultural y social de su época, y posteriormente, en ese contexto, damos una semblanza de la vida y la labor científica de nuestro protagonista.

La idea del éter aparece de manera natural en la relación entre las concepciones mecánica y electromagnética de la naturaleza. En el capítulo 2 analizamos algunos de los aspectos

en torno a la hipótesis del éter, su historia y la crisis en que se encontraba, haciéndolo desde la perspectiva de Paul Ehrenfest, basándonos en su conferencia inaugural de 1912, al asumir el puesto de profesor de física teórica en la Universidad de Leiden en sucesión de Lorentz, y en un artículo del mismo autor donde critica algunos de los puntos de vista de Einstein. En la búsqueda de 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.

La mecánica estadística, disciplina científica que empezó a desarrollarse a mediados del siglo XIX, presenta dos aspectos que la hacen susceptible de discusiones de carácter filosófico y epistemológico: el uso que hace de la hipótesis atómica y la introducción de nociones probabilísticas. En el capítulo 3 hacemos una revisión de sus orígenes y sus problemáticas basándonos en los escritos de Paul y Tatiana Ehrenfest. En la exposición que ofrecemos, nos detenemos en tres momentos claves: la visión que Paul Ehrenfest tenía de su maestro Boltzmann, expuesta en un obituario escrito en 1906; dos artículos escritos por Paul y Tatiana en 1906 y 1907, donde abordan de una manera penetrante algunas de las incongruencias que presentaba en ese momento la mecánica estadística y, finalmente, un artículo escrito por encargo y que apareció en 1911, en el que presentan el desarrollo de la disciplina, el estado que ostentaba en ese momento y las preguntas que faltaba por responder en torno a ella. En esos trabajos, Paul y Tatiana abordan esta materia desde una perspectiva crítica, indicando paradojas y clarificando con-

ceptos, dejando así una huella importante para posteriores investigadores de esa disciplina.

En el capítulo 4 nos referimos al drama cuántico que surge de la convergencia de diferentes ideas en torno a los paradigmas de explicación física mencionados anteriormente. Por un lado encontramos la búsqueda de Planck para esclarecer el concepto de entropía, basándose en la electrodinámica de Maxwell, y por otro la insatisfacción que sentía Einstein en su ideal de visión unificada de la física, al tener que considerar por un lado la existencia de partículas materiales discretas y de un campo continuo por el otro. La crítica y la aportación de Paul Ehrenfest sobre este tema, del cual se ocupó, a diferencia de otros físicos, desde un principio, es un recurso muy valioso para el estudio de los orígenes de la teoría cuántica. En sus escritos sobre el tema, Ehrenfest se ocupa de dilucidar la validez de las analogías y metodologías utilizadas y se preocupa por el carácter de las hipótesis, supuestos y condiciones utilizadas, dándole a sus reflexiones un carácter de interés epistemológico.

La asimilación y maduración de nuevas ideas y conceptos en el campo de la física requirió del establecimiento de vínculos con sus antecesoras antes de poder desprenderse de ellas y formar una nueva estructura totalizadora de comprensión en el campo de estudio de esta disciplina. En el capítulo 5 estudiaremos la forma en que Ehrenfest con su principio adiabático, y Bohr con su principio de correspondencia, tendieron estos puentes entre la visión mecanicista y electromagnética clásica y las nuevas teorías, en un esfuerzo por reconciliar el viejo mundo con el nuevo, en lugar de abocarse simplemente a la mera explotación de una nueva herramienta.

Por último, en el capítulo 6, pero solamente a manera de epílogo, nos referiremos muy brevemente a la génesis de la mecánica cuántica como estructura teórica ya totalmente diferenciada de la física clásica.

El trabajo de investigación aquí plasmado requirió por supuesto de ir a la obra original de Paul Ehrenfest¹ y de llevar a cabo la traducción al español de parte de ella. A manera de ejemplo del estilo y la actitud ante los problemas científicos que caracterizaban a este personaje, incluimos en un apéndice nuestra traducción al español de su conferencia inaugural de 1912 en la Universidad de Leiden, al incorporarse a la cátedra de Física Teórica.

.....
¹ Martin Klein reunió en 1959 la mayor parte de sus trabajos y los publicó bajo el título de *Collected Scientific Papers*. Véase Ehrenfest (1959).