

APROXIMACIÓN AL OBJETO Y ESTRUCTURA DE LA TEORÍA FÍSICA DE PIERRE DUHEM

Luis Humberto Hernández M.

ABSTRACT

This essay discusses some problems in Pierre Duhem's La Théorie Physique. Son Objet-Sa Structure. Particularly, I call the attention to the notion of "theory", the relationships between science and metaphysics, the critique of the crucial experiments, and holism. Those issues treated by Duhem, who is a physicist, historian and science philosopher, have been very important in subsequent reflections like those of Karl Popper, Imre Lakatos, and Thomas Kuhn.

La crisis de fundamentos por la que atravesó la física a principios de siglo¹, generó un sinnúmero de reflexiones de carácter metodológico. De los escritos² realizados en este sentido por científicos profesionales se destaca: *Objeto y estructura de la teoría física* de Pierre Duhem (1861 - 1916), publicado en 1906³. Este libro recoge buena parte de las in-

1. La crisis de fundamentos de la física tiene origen en las dificultades que afrontó la mecánica clásica de partículas, propuesta por Isaac Newton a finales del siglo XVII, para explicar fenómenos relacionados con la propagación de las radiaciones electromagnéticas y el calor. Finalmente, este proceso desembocó en la formulación de dos teorías que cambiaron la faz de la física del siglo XX: la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica.

2. Algunos de los casos más destacados son: Kirchhoff, quien publicó en 1874 *Los principios de la mecánica*, en cuyo prefacio resume el programa del positivismo científico. Ernst Mach, quien publicó en 1883 *La ciencia de la mecánica*, obra en la que elabora una crítica a los conceptos de espacio y tiempo absolutos, de la mecánica newtoniana. W. K. Clifford, quien publicó en 1885 *El sentido común de las ciencias exactas*, donde reflexiona sobre las consecuencias de las nuevas geometrías no-euclidianas. H. Hertz, quien publicó en 1894 *Los principios de la mecánica* presentados de una forma nueva, obra en la que se propuso distinguir los aspectos *a priori* y empíricos existentes en la mecánica clásica. Henri Poincaré, quien publicó en 1902 *Ciencia e hipótesis*. Pierre Duhem, quien publicó en 1906 *El objeto y la estructura de la teoría física*, obra a la que vamos a dedicar este trabajo. También se destacan los escritos de Ludwig Boltzmann sobre algunos aspectos metodológicos que generaron sus contribuciones científicas.

3. En este trabajo se emplea la segunda edición publicada en 1914, *La Théorie*

quietudes metodológicas que se discutían en la época y ofrece respuestas interesantes desde el punto de vista de la filosofía de la ciencia. Teniendo como marco el análisis del concepto de teoría, Duhem reflexiona sobre problemas como las relaciones entre ciencia y metafísica, la génesis de la teoría en la física, el control experimental, la función didáctica de la historia de la ciencia, la evolución de las teorías, etc.; cuestiones que se destacan por la importancia que adquirieron en reflexiones posteriores, llevadas a cabo por autores como Karl Popper, Imre Lakatos, Thomas Kuhn. En muchos artículos de estos autores, aparecen referencias a las ideas de Duhem. Sin embargo, son pocos los trabajos que se dedican a mostrar una imagen de conjunto sobre sus reflexiones metodológicas. En este trabajo nos proponemos dar algunos pasos en este sentido.

DUHEM COMO HISTORIADOR DE LA CIENCIA

Duhem basó sus investigaciones históricas en un estudio pormenorizado de los textos originales y estableció nuevos modelos de documentación precisa en la historia de las ciencias. Aunque su concepción continuista sobre la evolución de la ciencia y la importancia que le otorga a la Edad Media cristiana no ha dejado de despertar fuertes objeciones, sus argumentos y documentación han desempeñado un papel importante en la moderna historia de las ciencias. Aproximadamente por la misma época en la que Duhem desarrollaba estas investigaciones, el alemán Emil Wohlwill trabajaba sobre los mismos períodos y problemas. Las obras de Duhem y Wohlwill formaron luego la base de una escuela de historia de la ciencia, entre cuyos integrantes se encuentra A. Maier, A. C. Crombie y M. Clagett.

Duhem fue precursor de los estudios sobre el desarrollo de la física durante la Edad Media y el Renacimiento. En este sentido, se propuso demostrar que la llamada revolución científica de los siglos XVI - XVII, generalmente asociada en sus comienzos al nombre de Galileo, fue la continuación de las corrientes antiaristotélicas generadas en el siglo XIV.

Physique. Son Objet-Sa Structure, Paris, Marcel Rivière et Cie. 2ª Ed., 1914, 509 pp. Los textos que aparecen citados en este trabajo son traducciones nuestras.

Para respaldar esta interpretación, Duhem analiza las consecuencias intelectuales de la condena promovida por el obispo de París Esteban Tempier, en 1277, contra 219 postulados extraídos de numerosas fuentes, incluidas las obras de Tomás de Aquino.

De los postulados incluidos en la condena de 1277, Duhem destaca aquellos⁴ que obligaban a admitir que Dios podía impulsar al universo en línea recta aún si existiera vacío y a reconocer que Él podía crear tantos mundos como quisiera. Duhem piensa que al insistir en el poder absoluto de Dios, tales postulados subvertían la cosmología y física aristotélica lo suficiente como para persuadir a algunos autores a reorientar sus investigaciones en un sentido no aristotélico.

Además de debilitar el dominio que la cosmología y la física aristotélica ejercían sobre el mundo docto, la condena de 1277 acabó con la creencia, entonces difundida, de que era posible el logro de la certeza en cuanto a las causas y las leyes de la naturaleza. Esto permitió que alternativas y posibilidades que en el siglo XIII eran difícilmente imaginables o susceptibles de análisis, fueran planteadas y exploradas en el siglo XIV. Ejemplos de estas alternativas son las reflexiones de Buridan y Oresme sobre la posibilidad de rotación diurna de la tierra sobre su eje, que anticipaban algunos de los postulados de Copérnico; el desarrollo de análisis de carácter matemático indispensables para pensar el problema del movimiento; y la teoría del ímpetus.

Esta interpretación ha resultado muy polémica, debido a que defiende una concepción continuista y acumulativa de la evolución de la física. Si se considera la evolución de la ciencia en este sentido, la búsqueda de los predecesores directos de una idea constituye una tarea central del historiador. Duhem es el exponente más destacado de la llamada técnica de la emergencia, método en el que se presenta la evolución de la ciencia como consecuencia de pequeños cambios y en el que, por lo tanto, no existe un comienzo claro.

Alexander Koyré, el opositor más destacado de la concepción continuista, reconoce que los resultados de los trabajos realizados en el

4. Los cuales dicen: «34 Que la primera causa [esto es, Dios] no podía crear varios mundos. 45. que Dios no puede ser la causa de un nuevo acto [o cosa], ni tampoco puede Él producir algo nuevo». Citado por Edward Grant, *La ciencia física en la Edad Media*, México, Fondo de Cultura Económica, 1983, 241 pp. Véase, Pág. 62.

siglo XIV fueron intelectualmente estimulantes y productivos, pero no lo suficientemente vigorosos como para debilitar perceptiblemente el sistema físico aristotélico. Koyré considera que la revolución científica del siglo XVII constituyó una ruptura que implicó el abandono de los conceptos fundamentales sobre los que descansaba la física y cosmología aristotélica y, evidentemente, esto no ocurrió en el siglo XIV. Por el contrario, Duhem se opone al concepto de revolución científica, diciendo que:

«Lo que generalmente se supone que fueron revoluciones intelectuales casi siempre fueron tan sólo evoluciones lentas y preparadas desde hacía mucho tiempo (...) El respeto por la tradición constituye una importante condición previa para el progreso científico»⁵.

BREVE CARACTERIZACIÓN DE LA CRISIS DE FUNDAMENTOS DE LA FÍSICA DE PRINCIPIOS DE SIGLO

Como señalamos al comienzo del trabajo, a finales del siglo XIX la física atravesaba por un período de crisis. Un acontecimiento de este tipo se origina cuando la visión tradicional de la naturaleza y las teorías con las que se construye se muestran insuficientes para explicar nuevos fenómenos. Como consecuencia de esta situación, algunos de los miembros de la comunidad científica comienzan a construir un nuevo marco teórico para abordar las dificultades que no han encontrado solución en el marco teórico vigente, y en el desarrollo de esta tarea se ven ante la necesidad de reflexionar sobre su propia actividad de investigación. Ya que el trabajo de Duhem como físico e historiador se desarrolló en un contexto de crisis, será conveniente hacer una breve referencia a esta situación.

Desde el siglo XVIII y hasta mediados del siglo XIX el ideal de conocimiento que había servido de orientación a la investigación científica se inspiraba en la ciencia newtoniana. Los conceptos fundamentales de esta teoría se consideraban indispensables como base para apuntalar cualquier conocimiento riguroso sobre la naturaleza, razón por la

5. Esto lo dice Duhem en *Les origenes de la statique*. Citado por Helge Kragh, *Introducción a la historia de la ciencia*, Barcelona, Editorial Crítica, 1989, págs. 28-29.

que muchos físicos consideraron la posibilidad de extenderlos a otras disciplinas. Esta propuesta mecanicista, como se la denominó, quedó expresada con claridad en las formulaciones preliminares que escribió Helmholtz para la primera presentación de la ley de conservación de la energía. Allí decía:

«La misión de la ciencia natural física... consiste en reducir los fenómenos naturales a fuerzas inmutables de atracción y repulsión, cuya intensidad depende de la distancia. La posibilidad de resolver este problema constituye, a la par, la condición para que pueda llegar a comprender plenamente la naturaleza... Pero la ciencia natural teórica, sino quiere quedarse a mitad de camino en su obra de comprensión, tiene necesariamente que poner sus ideas en consonancia con el postulado que se establece acerca de la naturaleza de las fuerzas simples y de los resultados a que conduce. Su misión terminará cuando haya logrado reducir los fenómenos a fuerzas simples y logre, al mismo tiempo, demostrar que esa reducción establecida por ella es la única que consienten los fenómenos de que se trata. En este caso, habría quedado demostrada como la forma necesaria de comprensión de la naturaleza, a la que, por tanto, habría que atribuir una verdad objetiva»⁶.

Helmholtz ve en el mecanismo el principio directriz de la investigación científica y defiende un programa reduccionista en el que todos los fenómenos deben explicarse en términos de fuerzas invariables atractivas y repulsivas. Sin embargo, un programa reduccionista de esta naturaleza estaba condenado al fracaso, ¿Qué impidió el éxito de dicho programa? La respuesta la encontramos en una conferencia pronunciada por Max Planck en 1910, en la ciudad Königsberg, ante investigadores de la naturaleza y médicos alemanes. En esta ocasión, el padre de la mecánica cuántica expuso los motivos que obligaron a los físicos a abandonar la concepción mecanicista de la naturaleza, entre los que se destacaba el problema de la mecánica del éter.

El fracaso del programa mecanicista fue el resultado de la conciencia que, paulatinamente, fueron adquiriendo los físicos sobre la imposibilidad de desarrollar una mecánica del éter. Esto quería decir que, si

6. Citado por Ernst Cassirer, *El problema del conocimiento*, México, Fondo de Cultura Económica, 1979, Volumen IV, pág. 108.

bien la mecánica clásica había logrado explicar un gran número de fenómenos, no estaba en condiciones de explicar todos los fenómenos de la naturaleza (como pretendía Helmholtz). En otras palabras, lo que fracasa es el proyecto reduccionista que pregonaba Helmholtz⁷.

Para entender este problema hay que tener en cuenta los descubrimientos de nuevas radiaciones electromagnéticas realizados a partir de la teoría electromagnética postulada por James Clerk Maxwell (1831-1879). Los descubrimientos más destacados fueron los que hoy conocemos como las ondas de radio, debido a Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) y los rayos X, descubiertos por Wilhelm Konrad Röntgen (1845-1923).

El problema que planteaba el descubrimiento de las nuevas radiaciones electromagnéticas, consistía en averiguar cuál era el medio que permitía que se propagaran de un lugar a otro. Se sabía que el sonido era una onda que necesita de un medio para propagarse. Pero, ¿a través de qué se propagan las ondas luminosas?, y en general, ¿a través de qué se propagan las radiaciones electromagnéticas, de las que la luz es únicamente una banda en el espectro electromagnético, sensible para el ojo humano?

Como era de esperar los físicos intentaron resolver el problema dentro del marco de las explicaciones mecanicistas, postulando como hipótesis un medio universal al que denominaron éter, a través del cual, suponían, se propagaban las diferentes radiaciones por el espacio.

Los intentos por hallar una mecánica del éter siguieron dos caminos: uno orientado por una hipótesis que concebía el éter como un fluido «perfecto», y otro que atribuía al éter las propiedades de un sólido elástico⁸. Los intentos más destacados para enfrentar el problema están asociados a la segunda clase de hipótesis, y se deben a William Thomson (lord Kelvin). En términos generales, los historiadores de la física consideran que la historia de la mecánica del éter, en la segunda mitad del siglo XIX, está asociada a los esfuerzos realizados por William Thomson.

Sin embargo, para que cualquiera de las dos hipótesis mencionadas ofreciera una explicación satisfactoria, el éter debía tener propiedades

7. Desde luego, esta interpretación se puede desarrollar con todas las sutilezas históricas del caso, sin embargo, este no es el lugar para emprender una tarea semejante.

8. Véase William Berkson, *Las teorías de los campos de fuerza. Desde Faraday hasta Einstein*, Madrid, Alianza Editorial, 1981, 400 pp.

extraordinarias y en muchos aspectos contradictorias con las que caracterizan cualquier material conocido. El golpe final contra esta hipótesis fue asestado por el fracaso de los experimentos para medir la corriente del éter a través del cual, se suponía, viajaba la tierra, efectuados en 1887 por Albert A. Michelson y Edward W. Morley⁹.

Además de los problemas generados por los esfuerzos para desarrollar una mecánica del éter, hay que mencionar el surgimiento, entre 1859 y 1865, de una nueva rama de la física denominada la termodinámica, cuyos fenómenos parecían necesitar de un aparato conceptual distinto al propuesto por la mecánica newtoniana.

En un principio la equivalencia entre calor y trabajo parecía favorecer la teoría cinética del calor y Helmholtz es el primero en señalarlo. Sin embargo, otro físico, William Macqorn Rankine (1820-1872), ofreció una interpretación diferente. Rankine razonaba de la siguiente manera: si tenemos una fórmula que nos permite traducir a voluntad calor en trabajo e inversamente, suficiente para las necesidades de cálculo y predicción en la física, ¿Por qué añadir a esta fórmula abstracta y bien establecida sobre la experiencia, la imagen puramente hipotética de movimientos subyacentes de partículas? El argumento toma una forma más general al considerar el principio de conservación de la energía, ¿por qué reducir todas las formas de energía a una sola de ellas, arbitrariamente privilegiada? La mecánica no tiene por qué regir todos los dominios de la física. Para Rankine la base del edificio de la física es la noción general de energía, de la cual la energía mecánica no es sino un caso particular que hay que poner en el mismo nivel que los otros: energía térmica, eléctrica, química, etc.

Como físico, Duhem compartió los planteamientos de Rankine. Los energetistas (como se les denominó por la época) pensaban que se debía terminar con el dominio de lo que ellos denominaban la mecánica racional. El objetivo que perseguían estos pensadores era el desarrollo de lo

9. El abandono de la hipótesis del éter creó las condiciones para el surgimiento de la teoría especial de la relatividad propuesta por Albert Einstein en 1905. Es importante señalar, sin embargo, que no todos los historiadores están de acuerdo en asignarle al experimento Michelson-Morley el carácter de un experimento crucial. Uno de los críticos de los experimentos cruciales es Pierre Duhem, como veremos en este trabajo. Véase Gerald Holton, *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein*, Madrid, Alianza Editorial, 1982, 359 pp.

que consideraban una «ciencia superior», a la que denominaron la energética, cuyo fin era la unificación de distintos ámbitos de la física¹⁰.

Las siguientes palabras de Ludwig Boltzmann, sintetizan los problemas y señalan la incertidumbre que reinaba entre los físicos sobre el futuro de esta disciplina, a principios de siglo:

«¿Continuará existiendo la mecánica antigua con las antiguas fuerzas, aunque despojadas de la metafísica, en sus aspectos esenciales o, por el contrario, quedará como una reliquia histórica siendo suplantada por las masas ocultas de Hertz o por una representación totalmente diferente? (...)

¿Ganará la visión mecanicista de la naturaleza algún día la batalla decisiva descubriendo una imagen mecánica del éter lumínico? (...)

¿Dominarán algún día los dos factores de la energía todos los fenómenos, o la gente se conformará con descubrir cada agente como la suma de todas las clases de fenómenos o, en definitiva, la teoría se convertirá en una simple colección de fórmulas y en la discusión de las ecuaciones correspondientes?»¹¹.

Los problemas que enfrentaba la física dieron pie a múltiples reflexiones de carácter metodológico sobre la naturaleza y estructura de las teorías, el valor de los experimentos, el tipo de explicaciones que debía adoptar la física, etc. Duhem ocupa un lugar destacado entre los físicos que reflexionaron sobre esta clase de problemas. Una de las razones de esto es que su libro *Objeto y estructura de la teoría física*, recoge buena parte de las inquietudes que se discutían en la época y ofrece respuestas interesantes desde el punto de vista de la filosofía de la ciencia. Como ha dicho A. Brenner¹², la recepción de la obra de Duhem ha atravesado por tres etapas que corresponden a lecturas diferentes y demuestran la riqueza de sus aportes: una lectura desde el positivismo lógico, centrada en la definición de teoría y las reglas de correspondencia, las cuales se postularon para relacionar los conceptos teóricos con los conceptos observacionales. Una lectura desde un punto de vista antipositivista, relacionada con el carácter teórico de las observaciones

10. Ludwik Boltzmann, padre de la termodinámica, se opuso a las tesis pregonadas por los energetistas. Véase *Escritos de mecánica y termodinámica*, Madrid, Alianza Editorial, 1986, 225 pp.

11. Véase *Ibid.* págs. 164-165.

12. Anastassios Brenner, Duhem face au post-positivisme, en *Revue Internationale de Philosophie*, Volume 46, No. 182, 1992.

y la crítica a los experimentos cruciales y al método inductivo. Y finalmente, una lectura desde el interés que muestra Duhem por las relaciones entre historia y filosofía de la física.

¿QUÉ ES UNA TEORÍA?

Duhem se propuso formular una filosofía de la física que fuera compatible con la concepción que tenía de la historia de esta ciencia. De allí que a lo largo de su libro recurra a casos tomados de la historia de la física, que emplea para corroborar sus afirmaciones de carácter metodológico¹³.

En la primera parte de su libro, Duhem ofrece una definición sobre el concepto de teoría. Esto lo hace a partir de la formulación del siguiente interrogante: ¿cuál es el objeto de la teoría física? La respuesta a esta pregunta surge al definir la teoría de la siguiente manera:

«La teoría física es un sistema abstracto que tiene por objeto *resumir y clasificar lógicamente* un conjunto de leyes experimentales, sin pretender explicarlas»¹⁴.

Analicemos esta definición. Lo primero es que en la definición que citamos antes, Duhem se limita a decir que la teoría es un sistema abstracto. La otra parte de la definición se refiere al objetivo que debe cumplir la teoría. Comencemos con la primera parte, ¿qué quiere decir que la teoría es un sistema abstracto?

Con la expresión «sistema abstracto» Duhem se refiere a la estructura lógico-matemática de la teoría. Según este autor, una teoría consta de un sistema axiomático (o hipótesis básicas, como también las denomina) y de «reglas de correspondencia», que correlacionan ciertos términos del sistema axiomático con magnitudes experimentalmente determinadas. El sistema axiomático y las reglas de correspondencia son suficientes para deducir las leyes experimentales¹⁵. Aunque Duhem no

13. Pierre Duhem, *La Théorie Physique. Son Object -Sa Structure*. Duhem advierte que sus reflexiones de carácter metodológico se aplican, en principio, sólo a la física. Véase pág. 218.

14. Véase, *Ibid.*, pág. 3.

15. Aunque Duhem no utiliza la expresión «reglas de correspondencia», queda claro que se trata del mismo concepto que más adelante será objeto de un análisis detallado por parte de los positivistas lógicos. Para estos autores, las reglas de

realiza un análisis sofisticado de la estructura lógica de las teorías, como sí lo harán más adelante los positivistas lógicos, queda claro que concibe la teoría como un sistema hipotético-deductivo de enunciados. Esto se puede apreciar con más claridad cuando describe lo que llama la génesis de la teoría.

Duhem señala cuatro operaciones fundamentales por las que atraviesa una teoría en su formación:

1. Definición y medida de las magnitudes físicas.
2. Elección de las hipótesis.
3. Desarrollo matemático de la teoría.
4. Comparación de la teoría con la experiencia.

Por la forma como se presentan las diferentes etapas en la formación de una teoría, resulta claro que se concibe como un sistema hipotético-deductivo de enunciados. Esto implica que la teoría se establece de manera autónoma dentro de una esfera completamente formal y matemática. Es al final del proceso deductivo que interviene la experiencia.

La primera etapa supone que entre las propiedades físicas que se quieren representar se escogen las más simples, y por medio de métodos de medida¹⁶ se hacen corresponder con ciertos símbolos matemáticos. Estos símbolos matemáticos tienen un valor meramente representativo de las propiedades físicas, permitiendo hacerlas medibles e identificables. La teoría suministra una traducción para los datos experimentales a través de un proceso en que esos datos se asocian a un

correspondencia le otorgan significado empírico a los conceptos teóricos. En un principio las reglas de correspondencia se concibieron como definiciones explícitas y fueron pensadas en la perspectiva del operacionalismo, propuesto por el físico P. W. Bridgmann en el libro *The logic of Modern Physics* (1927). En términos formales una regla de correspondencia toma la siguiente forma: $Qx = (Cx \supset Ex)$. Si interpretamos esta expresión como una definición operacional, entonces diríamos que un individuo x tiene la propiedad Q (donde 'Q' es un término teórico) si y sólo si es verdadero el enunciado "si se efectúa la operación C sobre x entonces x tendrá los efectos E ". Un ejemplo: un objeto es magnético (concepto teórico) si y sólo si se satisface la siguiente condición: si se coloca un pequeño trozo de hierro se moverá hacia el objeto (ésta sería la operación con la que se define el concepto teórico). Posteriormente, Rudolf Carnap, sugirió reemplazar las definiciones explícitas por enunciados de reducción.

16. Hablar de medida no significa que en esta etapa interviene la observación, pues, como veremos, para Duhem el proceso experimental implica la adopción de un marco teórico desde el cual se hace una interpretación de las «observaciones».

determinado simbolismo matemático. Como resultado de poner en relación estas magnitudes físicas surgen las *leyes experimentales*. Aquí Duhem toca un problema fundamental relacionado con la formación de los conceptos científicos, particularmente, en la física.

La segunda etapa consiste en relacionar las distintas magnitudes físicas obtenidas en el proceso anterior, mediante la introducción de un pequeño número de hipótesis (o axiomas), de las cuales extraerá la teoría sus consecuencias. La elección de estas hipótesis obedece, únicamente, a criterios de coherencia lógica y simplicidad.

La tercera etapa consiste en combinar las hipótesis elegidas en la anterior etapa, con las reglas del análisis matemático. El objetivo de este procedimiento es mostrar que en virtud de las hipótesis fundamentales de la teoría, la concomitancia de ciertas circunstancias implica determinadas consecuencias.

Por último, las diversas consecuencias extraídas de la hipótesis pueden traducirse a juicios sobre las propiedades físicas de los cuerpos, lo que se logra por métodos de medición apropiados, cuyo papel es relacionar los hechos observados por el físico y los símbolos numéricos empleados en la teoría. Esta etapa es la que se refiere a las reglas de correspondencia y entraña algunas de las observaciones más interesantes desde el punto de vista metodológico, como veremos más adelante.

Ahora podemos pasar a la segunda parte. La teoría definida como un sistema hipotético-deductivo posee un objetivo bien preciso, *resumir y clasificar* un conjunto de leyes experimentales. Ya hemos visto que las leyes experimentales surgen como parte del proceso de definición de las magnitudes físicas. Ahora veamos a qué se refiere Duhem con los conceptos de resumen y clasificación.

El concepto de resumen está asociado a la idea de economía de pensamiento (concepto que toma Duhem de Ernst Mach¹⁷). Existe economía en el proceso de formación de una teoría cuando el espíritu humano, enfrentado a un inmenso conjunto de hechos concretos, matizados por un sinnúmero de detalles que complican su retención y comunicación, logra, a través de un proceso de abstracción, extraer lo general de

17. Mach sostenía que la ciencia es un intento de ocuparse de forma económica del pensamiento, mediante la descripción de un amplio número de experiencias diversas por medio de una fórmula matemática ampliamente aplicable y concisa.

todos ellos, para condensarlos en conceptos cuyas principales ventajas son prácticas, a saber, facilitar la comunicación y memorización. Duhem ofrece el siguiente ejemplo:

«en lugar de anotar uno a uno los diversos casos de refracción de la luz, podemos reproducirlos y preverlos todos cuando sabemos que el rayo incidente, el rayo refractado y la normal están en el mismo plano y que el $\text{Sen } i = n \text{ Sen } r$. En lugar de tener en cuenta los innumerables fenómenos de refracción en los medios y bajo diferentes ángulos, no tenemos más que observar el valor de n , teniendo en cuenta las relaciones antes mencionadas, lo que es infinitamente más fácil. La tendencia a la economía aquí, es evidente»¹⁸.

En cuanto al concepto de clasificación, Duhem señala que la teoría acompañada de las numerosas ramificaciones deductivas que la caracterizan, permite elaborar una especie de «taxonomía» de las leyes experimentales, evidenciada por las múltiples relaciones que surgen entre los principios y estas leyes.

La clasificación introduce un orden que hace que la teoría física una «herramienta», a tal punto que Duhem llega a compararla con un casillero destinado a guardar correctamente clasificadas las diversas herramientas destinadas a un fin determinado. Gracias a esto, el físico puede disponer de las leyes que necesita para resolver un determinado problema, sin omitir nada útil o emplear algo superfluo. Además de la comodidad, Duhem introduce consideraciones de orden estético:

«La teoría no solamente hace que el conjunto de leyes físicas sea más fácil de manejar, más cómodo, más útil, lo hace también más bello»¹⁹.

Finalmente, Duhem señala que la teoría no es una explicación de las leyes experimentales. ¿Qué quiere decir con esta afirmación? Para Duhem la teoría no debe hacer referencia a una supuesta realidad subyacente a los fenómenos, ni buscar las causas ocultas de los mismos²⁰. A partir de esta definición del concepto de explicación, Duhem plantea

18. Véase Pierre Duhem. *La Théorie Physique. Son Objet - Sa Structure*, pág. 25.

19. Véase *Ibid.*, pág. 31.

20. *Ibid.*, pág. 13 y siguientes. Este capítulo está dedicado a la discusión sobre el papel de las causas ocultas en la historia de la física. Este aspecto es interesante, pues de aquí se desprende el argumento más importante de Duhem contra la intervención de la metafísica en la física. Duhem presenta varios ejemplos sobre las «querellas de las causas ocultas», y señala que estas discusiones se presentan cuando

el problema de las relaciones entre ciencia y metafísica, atribuyendo a esta última, exclusivamente, la búsqueda de explicaciones.

Pero, ¿cuál es la razón por la que la teoría no debe buscar explicaciones? Duhem responde que al buscar explicaciones el físico está subordinando la física a la metafísica. De ser así, la física tendría que afrontar preguntas como: ¿de qué naturaleza son los elementos que constituyen la realidad material? ¿Existe una realidad material distinta de las apariencias sensibles? De aceptarse esta clase de problemas la teoría terminaría fundada sobre las bases proporcionadas por un sistema metafísico, lo que se convertiría en un obstáculo para el desarrollo de la física. Uno de esos obstáculos sería la imposibilidad de lograr un consenso entre los físicos, debido a la imposibilidad de responder las preguntas metafísicas apelando a la experimentación. Duhem ofrece un ejemplo al respecto: en la física de Descartes la cantidad de movimiento tiene como fundamento la idea de inmutabilidad divina, que es un concepto que hace parte de su sistema metafísico. Pero tomando como base únicamente esta idea es imposible deducir la forma matemática que tomará efectivamente la cantidad de movimiento. Ésta podría ser mv , pero cabe preguntar ¿Por qué no mvz -fuerza viva de Leibniz-? Esta clase de problemas, concluye Duhem, sólo pueden resolverse apartando los problemas metafísicos y apelando al experimento.

Al negarle carácter explicativo a las teorías, Duhem se convierte en un exponente de la concepción instrumentalista. Esta idea ya se encuentra expuesta en el famoso prefacio al libro de Copérnico *Sobre la revolución de los orbes celestes*, escrito por Andreas Osiander. Allí se dice:

«(...) Pues es propio del astrónomo calcular la historia de los movimientos celestes con una labor dirigente y diestra. Y además concebir y configurar las causas de estos movimientos, o sus hipótesis, cuando por medio de ningún proceso racional pueda averiguar *las verdaderas causas* de ellos. Y con tales supuestos puede calcularse correctamente dichos movimientos a partir de los principios de la geometría, tanto mi-

una escuela asigna ciertas propiedades que para sus contendientes resultan insostenibles. Al no existir criterios precisos -que para Duhem tienen que ver con el proceso experimental- para zanjar las diferencias, estas discusiones se hacen interminables. Un ejemplo de esta situación es la discusión entre newtonianos y cartesianos sobre atracción y repulsión, características que los primeros asignaban a la materia.

rando hacia el futuro como hacia el pasado. Ambas cosas ha establecido este autor de forma notable. *Y no es necesario que estas hipótesis sean verdaderas*, ni siquiera que sean verosímiles, sino que se basta con que muestren un cálculo coincidente con las observaciones (...)»²¹.

El argumento de Osiander consistía en afirmar que Copérnico estaba trabajando en la tradición de aquellos astrónomos que inventaban libremente modelos matemáticos con el propósito de predecir las posiciones de los planetas, sin importar si tales modelos dan cuenta de la «realidad». A esta forma de proceder se le había denominado, tradicionalmente, «salvar las apariencias», que significa que la teoría de Copérnico era capaz de hacer cálculos y predicciones coincidentes con las observaciones, sin comprometerse con el problema de la verdad de sus afirmaciones²².

Desde el punto de vista histórico, Duhem estudió el debate sobre salvar las apariencias, particularmente, su vinculación con la tradición nominalista²³. En el capítulo tercero de la primera parte de su libro, Duhem se propone realizar una revisión histórica sobre las opiniones manifestadas por los físicos acerca de la naturaleza de las teorías²⁴, llegando a la conclusión de que todas las opiniones al respecto no han sido más que una variación sobre el debate de salvar las apariencias.

Duhem señala que en un pasaje, conocido desde 1271 en una traducción latina, Simplicio²⁵, importante comentarista griego del siglo VI, mencionaba en su comentario del libro de Aristóteles *De los cielos*, que ciertos astrónomos adoptaban diferentes hipótesis sobre los mecanismos que regían los movimientos celestes, sin comprometerse con su

21. Véase Nicolás Copérnico, *Sobre las revoluciones de los orbes celestes*, Madrid, Editora Nacional, 1982, 550 pp. Véase pág. 85. La Cursiva es nuestra.

22. Hay que señalar que Copérnico se opuso a esta interpretación de su teoría. Más tarde Galileo hizo una crítica de la interpretación instrumentalista de la teoría copernicana en un trabajo llamado *Consideraciones sobre la opinión copernicana*. Véase Nicolás Copérnico, Thomas Digges, Galileo Galilei. *Opúsculos sobre el movimiento de la tierra*, Madrid, Alianza Editorial, 1993, 100 pp.

23. Véase Pierre Duhem. *Essai Sur la Notion de Théorie Physique. De Platon a Galilée*, Paris, Librairie Scientifique A. Hermann et Fils, 1908, 140 pp.

24. Véase Pierre Duhem, *La théorie Physique. Son objet - Sa Structure*, Especialmente el párrafo segundo, capítulo tercero (primera parte), titulado: «Las opiniones de los físicos sobre la naturaleza de las teorías físicas».

25. Véase *Ibid.*, pág. 56.

existencia real. Y destaca cómo las influencias nominalistas del siglo XIV sirvieron para reforzar la doctrina de salvar las apariencias y tuvieron gran impacto en eminentes pensadores escolásticos como Juan Buridan, Nicolás de Oresme, Alberto de Sajonia y Pedro de Ailly.

Duhem encuentra en estas discusiones los orígenes de su concepción sobre la teoría. Insiste en que muchos autores se han equivocado al pensar la teoría como algo más que un instrumento para salvar las apariencias, tratando de introducir consideraciones sobre la existencia de una realidad subyacente a los fenómenos de la cual debería dar cuenta también²⁶.

Desde la perspectiva instrumentalista, Duhem critica el empleo de modelos mecánicos, que concibe como imágenes concretas utilizadas para ilustrar los conceptos abstractos presentes en la teoría. La teoría puede llevar asociada un modelo, pero éste no forma parte de su estructura lógica y en consecuencia, no toma parte en la tarea de predecir el resultado de los experimentos. Para ilustrar esta idea Duhem pone como ejemplo el caso de la acústica. Cuando investiga en este campo, lo primero que encuentra el físico es una serie de sonidos de diversos matices a los cuales se les puede denominar *hechos acústicos*. Estas sensaciones particulares y concretas tienen que pasar por un proceso de elaboración que permita la obtención de nociones abstractas y generales como: intensidad, altura, acorde, etc. Como resultado de las relaciones que se establecen entre estas nociones, el físico obtiene las *leyes experimentales* de la acústica. En este ejemplo el modelo mecánico que se asocia a las leyes experimentales es el de un movimiento periódico muy pequeño y rápido, denominado onda. Duhem critica a los físicos que pretenden explicar las propiedades del sonido en términos de este modelo, es decir, afirmando que la intensidad y la altura, por ejemplo, no son más que aspectos exteriores de la amplitud y frecuencia de la onda. A pesar de todo, Duhem reconoce que los modelos mecánicos pueden tener un valor heurístico en la búsqueda de nuevas leyes experimentales.

Para terminar este apartado, hay que hacer referencia a una idea que

26. Para Duhem Descartes es el representante más destacado de la idea de que la teoría, siendo heredera de la antigua «filosofía de la naturaleza», tiene como meta fundamental establecer las causas ocultas de los fenómenos. Por el contrario, Newton fue el abanderado de la lucha contra las causas ocultas, al menos en el campo de la «filosofía experimental».

sirve para moderar la concepción instrumentalista desde la que Duhem piensa la teoría. Duhem establece un peculiar compromiso con lo que se podría llamar un realismo metafísico. Éste se expresa a través del concepto de *clasificación natural*, según el cual el orden lógico que introduce la teoría a través de la clasificación, no es artificial o arbitrario, sino que corresponde a las relaciones que se dan entre los objetos concretos.

Decimos que es un peculiar compromiso, pues Duhem se apresura a señalar que esta idea queda confinada al nivel de una sospecha o presentimiento:

«Así, el análisis de los métodos por los cuales se edifican las teorías físicas nos prueba con entera evidencia que esas teorías no podrían darnos una explicación de las leyes experimentales; y de otra parte, por un acto de fe que este análisis es incapaz de justificar, como también de impedir, nosotros aseguramos que esas teorías no son únicamente un sistema artificial, sino, además, una clasificación natural (...)»²⁷.

A pesar de esto, Duhem llama la atención sobre el hecho de que si no se piensa la teoría como una clasificación natural, es imposible explicar el éxito predictivo de la misma. Por ejemplo, el desarrollo matemático de la teoría ondulatoria de la luz debida a Fresnel, preveía la aparición de una mancha muy luminosa en el centro de la sombra proyectada en una pequeña pantalla. El resultado positivo del experimento parece indicar que la teoría, al poder prever la aparición de ciertos fenómenos, facilita algo del mundo real.

EXPERIENCIA Y CONTROL EXPERIMENTAL

Como decíamos antes, los problemas relacionados con la experiencia y el control experimental constituyen el ámbito en el que Duhem hace las contribuciones más originales a las discusiones metodológicas.

El primer aspecto tiene que ver con el carácter teórico de las observaciones. Duhem considera simplista la postura de quienes creen en la posibilidad de describir directamente el contenido de una observación, pues piensa que no existe ningún hecho libre de teoría:

«Entremos en un laboratorio, acerquémonos a la mesa poblada por

27. Véase Pierre Duhem, *La Théorie Physique. Son Objet-Sa Structure*, pág. 36.

una multitud de aparatos, una pila eléctrica, alambre de cobre recubierto de seda, pequeñas vasijas de mercurio, bobinas y un espejo montado en una barra de hierro; el experimentador está insertando en pequeñas aberturas los extremos metálicos de unos alfileres con cabeza de ébano; la barra de hierro oscila, y el espejo adosado a ella lanza una banda luminosa sobre una escala de celuloide; el movimiento hacia atrás y adelante de esta señal permite al físico observar mínimas oscilaciones de la barra de hierro. Pero preguntémosle qué es lo que está haciendo. ¿Responderá «estoy estudiando las oscilaciones de una barra de hierro que soporta un espejo»? No, dirá que está midiendo la resistencia eléctrica de las bobinas. Si nos quedamos sorprendidos y le preguntamos qué significan sus palabras, qué relación tienen con los fenómenos que estaba observando y que nosotros contemplábamos al mismo tiempo que él, nos responderá que nuestra pregunta requiere una larga explicación y que deberíamos seguir un curso de electricidad»²⁸.

Por lo tanto, observar lo que el físico del ejemplo considera que él está observando requiere algo más que una visión normal. El físico experimental dispone de un «aparato esquemático y abstracto» (o marco teórico) que le permite interpretar las observaciones a la luz de una determinada teoría. Si un físico habla de «observar» una presión o una temperatura, está suponiendo una relación teórica, entre, por ejemplo, la temperatura que mide una columna de mercurio y las propiedades del mercurio, descritas por una teoría perteneciente a la química.

Duhem señala, además, que los experimentos empleados en la investigación tienen un margen de error finito. Por ejemplo, si lo que marca un manómetro es 3,5 y su límite de error experimental es de $\pm 0,1$ de atmósferas, entonces cualquier presión entre 3,4 y 3,6 atmósferas es compatible con la lectura. Esto significa que un gran número de datos teóricos son compatibles con un conjunto de condiciones experimentales dadas.

Las anteriores consideraciones están asociadas con la crítica de Duhem a la concepción inductivista que Newton había planteado en el *Scholium* general de los *Principia*, según el cual, la filosofía natural debe limitarse a las proposiciones alcanzadas por generalizaciones

28. Véase *Ibid.*, pág. 218.

inductivas a partir de enunciados sobre fenómenos. Duhem lo expresa de la siguiente forma:

«(...) Dos escollos inevitables hacen impracticable al científico el camino puramente inductivo. En primer lugar, ninguna ley experimental puede servir al teórico antes de haber experimentado una interpretación que implica la adhesión a todo un conjunto de teorías. En segundo lugar, ninguna ley experimental es exacta, sino sólo aproximada y por tanto susceptible de una infinidad de traducciones simbólicas distintas; y entre todas estas traducciones, el físico debe elegir una que le proporcione una hipótesis fructífera, sin que su elección esté guiada por la experiencia»²⁹.

El segundo aspecto tiene que ver con el holismo y la crítica a los experimentos cruciales.

Duhem afirma que sólo es posible someter al control experimental un conjunto de hipótesis, ya que la teoría constituye un todo en el que no se pueden aislar las hipótesis:

«Aquí nos encontramos lejos del método experimental tal como lo conciben las personas que son extrañas a su funcionamiento. Comúnmente se piensa que cada una de las hipótesis que emplea la física pueden tomarse aisladamente, someterse al control experimental, y una vez comprobado su valor por medio de múltiples experimentos, ubicarlas de manera definitiva en el sistema de la física. En realidad, esto no es así. La física no es como una máquina que se deja desmontar, en la que se puede ensayar cada pieza aisladamente y esperar, para ajustarla, a que su solidez haya sido controlada minuciosamente. La ciencia física es un sistema que debe tomarse como un todo. Es un organismo en el que no se puede hacer funcionar una parte sin que las otras partes entren en juego, unas en mayor medida que otras, pero todas en algún grado. Si se presenta alguna molestia en su funcionamiento, el físico deberá adivinar el órgano que debe ser restablecido o modificado, por el efecto producido sobre todo el sistema, pues no es posible aislar ese órgano para examinarlo (...)»³⁰.

Los postulados fundamentales del holismo se pueden resumir de la siguiente manera:

29. Véase *Ibid.*, pág. 303.

30. Véase *Ibid.*, pág. 284.

- Cuando se lleva a cabo una contrastación, lo que contrastamos es un conjunto de hipótesis (teoría) y no una hipótesis aislada.
- Cuando una teoría supera una contrastación, no podemos asignar un nivel específico de confianza a las hipótesis individuales que componen la teoría.
- Una teoría se acepta o rechaza como un todo y no por partes.
- No existe nada parecido al rechazo de una teoría debido a un *experimento crucial*.

Como se puede apreciar, el holismo tiene consecuencias en la forma como Duhem concibe el problema de la contrastación de las teorías. Si la experiencia contradice una predicción de la teoría, podemos concluir que al menos una de las hipótesis que hacen parte del conjunto teórico es inaceptable, sin embargo, el científico no está en condiciones de saber cuál miembro del grupo de hipótesis es el causante del problema. Desde este punto de vista, por ejemplo, la célebre experiencia de Foucault, relativa a la medida de la velocidad de la luz en el aire y en el agua, no posee el carácter de experimento crucial que algunos autores le atribuyen. Todo lo que nos enseña es que una de las hipótesis sobre la que se apoya la teoría corpuscular no es satisfactoria, pero no establece cuál de ellas. Esto abre la posibilidad de adaptar la teoría corpuscular de la luz al nuevo resultado experimental, es decir, inmunizarla frente a la crítica empírica.

Precisando más esta idea, Duhem piensa que no se le puede atribuir un papel determinante al *modus tollens*, y con él a la posibilidad lógica de la refutación empírica. Si se designa C a la teoría copernicana y P a la de Ptolomeo, y e las fases de venus, es claro que la falsedad de P no entraña la verdad de C, ya que siempre es posible construir una teoría T (como la de Tycho Brahe) incompatible con las dos primeras, pero que implique e.

Aquí surge uno de los aportes más significativos de Duhem, que consiste en señalar la posibilidad de imaginar una variante T de la teoría T' que se está contrastando -la cual está completamente refutada- tal que T'' implica una consecuencia e de T', cualquiera que sea e, y que T'' no esté refutada. Dicho de otra manera, si nuestra intención es salvaguardar e, compuesta de T', siempre podemos hacerlo en principio. Al plantear la posibilidad de inmunizar las teorías contra la refutación,

Duhem está diciendo que la conjunción de la lógica y la experiencia no es suficiente para determinar el error, y que, por lo tanto, la experiencia es esencialmente ambigua. Estos argumentos volverán a aparecer en boca de los críticos más severos del falsacionismo popperiano.

Aquí están presentes los problemas relativos a la elección de teorías concurrentes y a la introducción de hipótesis *ad hoc* para protegerlas de los resultados negativos como resultado de la contrastación experimental.

En este breve recorrido por algunas de las ideas de Pierre Duhem sobre la estructura de las teorías y, en general, el método científico, hemos tratado de mostrar la riqueza y el interés que guardan, aún hoy, algunas de sus reflexiones.