

La cosmovisión de Pierre Duhem. Una perspectiva fenomenológica

Pierre Duhem's. world view a phenomenological perspective

Olga Luz Dary Rodríguez
Grupo ECCE Estudios Culturales sobre las Ciencias y su Enseñanza
Universidad de Antioquia
Medellín - Colombia
ldrodriguez@ayura.udea.edu.co

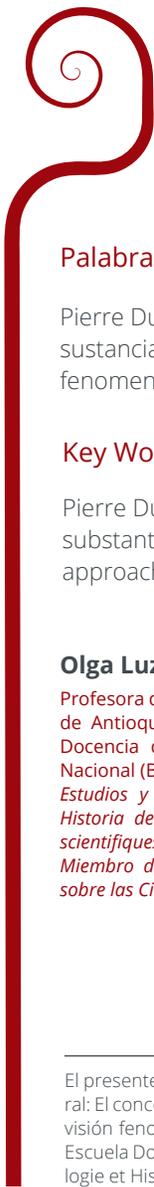
Resumen

Presentamos una caracterización de la cosmovisión del físico, historiador y filósofo francés Pierre Duhem (1861-1916). En una instancia preliminar exponemos la visión mecanicista bajo tres ejes: uno, la causalidad y la sustancia como pilares de la física clásica, dos, la realidad objetiva y la ausencia del sujeto y tres, los modelos mecánicos. En un segundo momento planteamos una mirada crítica sobre el mecanicismo, a partir de tres aspectos: primero, la exclusividad mecánica y el sustancialismo; segundo, la causalidad y la explicación de los fenómenos; y tercero, los modelos, la exclusividad matemática y la ausencia de experiencia. Para concluir abordamos la perspectiva de Duhem resaltando su carácter holista y su enfoque fenomenológico.

Abstract

It is shown a characterization of the French physicist historian and philosopher Pierre Duhem's worldview. In a preliminary instance it is exposed the mechanistic view under three axes: one, causality and substance as pillars of classical physics; two, objective reality and the absence of the subject; and three, mechanical models. In a second step we propose a critical look at the mechanism, from three aspects: first, the mechanics' exclusivity and substantialism; second, causality and the explanation of the phenomena; and third models, mathematical exclusivity and lack of experience. To conclude we address Duhem perspective highlighting: its holistic and phenomenological approach.

Junio 16 de 2013 * Enero 16 de 2014



Palabras Clave

Pierre Duhem, cosmovisión, mecanicismo, sustancialismo, causalidad, enfoque fenomenológico, mundo físico, leyes físicas.

Key Words

Pierre Duhem's, worldview, mechanism, substantialism, causality, phenomenological approach, physical world, physical laws.

Olga Luz Dary Rodríguez

Profesora de la Facultad de Educación de la Universidad de Antioquia, Licenciado con en física y Magister en Docencia de la física de la Universidad Pedagógica Nacional (Bogotá, Colombia).

Estudios y candidata a doctorado en Epistemología e Historia de las Ciencias de la Escuela Doctoral Savoirs scientifiques, Universidad de París VII (París, Francia). Miembro del grupo de investigación Estudios Culturales sobre las Ciencias y su Enseñanza-ECCE.

El presente artículo se elaboró en el marco de mi tesis doctoral: El concepto de estado físico en Pierre Duhem: una cosmovisión fenomenológica desde la continuidad epistemológica; Escuela Doctoral Savoirs scientifiques, Doctorat en Épistémologie et Histoire des sciences de la Universidad de Paris VII.

Pierre Duhem es un físico, historiador y filósofo francés. Su obra comprende la interrelación de estos tres campos del saber. Su producción en el campo de la física trata sobre termodinámica, electromagnetismo, hidrodinámica y elasticidad.

Su propuesta en física está inserta en una serie de interrelaciones con otros campos del saber, y en este sentido nos referimos a su *cosmovisión* o *visión de mundo*. De manera análoga J. F. Stoffel analiza la totalidad de la obra duhemniana y se refiere a un *proyecto global* (Stoffel, 2002), en cuanto involucra no solo la ciencia, sino también la historia y la filosofía de las ciencias. La conclusión del estudio de Stoffel es un referente para nuestro trabajo. Si bien este autor pone en evidencia contradicciones sobre la obra global de Duhem, y apela para ello al *fenomenalismo problemático* de Duhem, finalmente disuelve este dilema y le confiere a la obra en su totalidad una armonía.

M. Paty (1986) considera que para Duhem la física es indisociable, fundamentalmente, de una epistemología, que interroga los principios, así como de la lógica que los ordena. También plantea que Duhem verifica de manera experimental su concepción de la física y de la teoría física mediante la historia. De igual forma, para A. Brenner (1992), la historia de las ciencias en Duhem tiene varias funciones, entre ellas, que constituye un elemento indispensable en la enseñanza de la física. Pero el eje principal del análisis de este autor lo conforma la relación entre la historia y la metodología, en cuanto esta relación define la estructura de la obra duhemniana.

Otro referente de nuestro trabajo es reconocer que el centro del proyecto duhemniano es su propuesta en física. Stoffel, R. N. D. Martin y Brenner plantean que el centro de su trabajo es su proyecto científico. Stanley Jaki dedica su texto de 1984, *Uneasy Genius: The Life and Work of Pierre Duhem*, al físico que siempre quiso ser.

Procuraré identificar algunos rasgos característicos de la cosmovisión de Pierre Duhem tomando como eje su propuesta en física. Dicha propuesta la denominó *fenomenológica*, en cuanto ella ofrece elementos epistemológicos alternativos a la mirada clásica, de tal manera que abre camino a conceptos novedosos como el de estado físico. A modo de preámbulo a mi interpretación de la física duhemniana, presentaré la cosmovisión mecanicista, objeto de crítica de Duhem, sus dificultades y algunos cuestionamientos.

El mecanicismo

En el siglo XVII hubo cambios en la sociedad europea, las preguntas acerca del movimiento de los cuerpos materiales se volvieron centrales para la cosmovisión de la sociedad. Emergió la burguesía como un nuevo grupo social, que llegó al poder en la Revolución Francesa. La visión mecanicista congeniaba con los intereses de este grupo, esta visión de la sociedad como una máquina estaba de acuerdo con las leyes de la razón. Descartes fue quien propuso esta visión: Todos los movimientos del universo, incluso los orgánicos, se podían explicar en términos de máquinas. Su metáfora era el reloj.

Duhem ubica dos vertientes del mecanicismo. Una, la radical en Descartes, que denomina *física de la cantidad*, que plantea la existencia en todo el universo de una materia única y homogénea, de la que solo se sabe que es extensa en longitud, anchura y profundidad, lo que se llama cantidad o volumen; esta materia es divisible en partes de diversas figuras que se pueden mover una en relación a las otras.

La otra vertiente es la dinamista, que introduce el concepto de fuerza, define el mecanicismo como una doctrina que se propone representar todos los fenómenos físicos por medio de sistemas que se mueven según los principios de la dinámica (las ecuaciones de Lagrange). Duhem hace dos subdivisiones: el mecanicismo de Newton, de Huygens, de Bosovich, de Laplace y de Poisson, que admite que los cuerpos ejercen entre sí fuerzas a distancia; y la segunda, la física mecanicista de Hertz desde la que no se admiten sino las fuerzas de unión entre dos cuerpos contiguos (Duhem, 2003).

Causalidad y sustancia, pilares de la física clásica

Según Cassirer, en los siglos XVIII y XIX no se dudaba acerca de la existencia de una jerarquía del ser, a la que la ciencia debía ceñirse en su estructura. El ideal del conocimiento físico era el de la ciencia newtoniana. Los fenómenos de la naturaleza se encuadran en el esquema de la teoría de la gravitación. De otra parte, la forma de la ley establecida por Coulomb para los fenómenos magnéticos y eléctricos mostraba una coincidencia total entre estos y los fenómenos de gravitación. De aquí que se considerara no solo lícito, sino incluso obligado, hacer del concepto de la fuerza a distancia el centro de toda verdadera explicación de la naturaleza.

Helmholtz en su primera formulación de la ley de la conservación de la energía, proclama como un axioma general la fuerza a distancia de Newton. Todos los efectos naturales deben atribuirse a las fuerzas de atracción y repulsión. Solo así es posible ajustarse a la ley suprema de toda investigación científica, a la ley de la causalidad: se produce en todo tiempo y bajo las mismas circunstancias externas, efectos iguales (Cassirer, 1986).

Pierre Duhem es un físico, historiador y filósofo francés. Su obra comprende la interrelación de estos tres campos del saber. Su producción en el campo de la física trata sobre termodinámica, electromagnetismo, hidrodinámica y elasticidad.

Helmholtz en *Sobre la conservación de la fuerza* (1847) instituye el principio general de la causalidad como la forma primitiva del pensamiento físico. Este principio es la condición necesaria de la problemática científica misma, es la condición de inteligibilidad de la naturaleza. Desde aquí se ofrecía una posibilidad: determinar y modelar el concepto general de causalidad de tal modo que de él se derivara directamente la necesidad de reducir todos los fenómenos de la naturaleza a puros fenómenos de movimiento. La concepción mecánica de la naturaleza exigía que toda hipótesis pudiera ser ilustrada directamente, y no se daba por complacida hasta no ver dibujados todos y cada uno de los rasgos concretos de la imagen.

Cassirer considera que en la obra de Wilhelm Wundt de 1866, *Los axiomas y su relación con el principio de causalidad*, se manifiesta esta tendencia. Considera que aquí se pueden evidenciar los motivos epistemológicos sobre los que descansa la explicación mecánica de la naturaleza. El primero de los seis axiomas físicos que proclama la obra de Wundt es la tesis de que todas las causas de la naturaleza son causas del movimiento. Esta explicación se derivaba como un simple corolario de los primeros conceptos fundamentales de todo conocimiento de la naturaleza, de los conceptos de sustancia y causalidad pilares de la física clásica. Se considera que la razón y la experiencia son capaces de penetrar en la esencia de las cosas, sin poner en duda el valor ontológico de las teorías físicas, por mucho que estas se diferencien en su contenido.

La realidad objetiva, ausencia del sujeto

Duhem considera que para los mecanicistas: "Una teoría física [...] tiene por objeto la EXPLICACIÓN *de un conjunto de leyes establecidas experimentalmente*" (Duhem, 1906-194/2003, p. 5). Duhem señala que los fenómenos físicos y las leyes no nos vinculan con la realidad sino con apariencias, por ello es necesario explicar. En el proceso de explicación la teoría física pretende "captar la realidad" e indaga acerca de "¿cuál es la naturaleza de los elementos que constituyen la realidad material?", sus causas mecánicas. Podemos decir que el mecanicismo instaura de manera natural en las causas últimas la realidad física. Desde esta cosmovisión, entonces, se utilizan modelos mecánicos para figurar la realidad. El atomismo de Boltzmann es un ejemplo de mecanicismo.

Duhem expone la teoría mecánica de la luz, en donde todas las nociones que estudian los fenómenos luminosos son representadas mediante propiedades mecánicas de un cierto medio: el éter. Dependiendo de la escuela, el sistema material puede estar formado por medios continuos, para otros de átomos aislados, unos admiten fuerzas atractivas o repulsivas entre los diversos elementos materiales; otros rechazan la existencia de tales fuerzas y prefieren optar porque los átomos materiales actúen al contacto según las leyes de choque. Existe igualmente otra serie de exigencias dependiendo de la escuela.

No obstante, participan de una consideración de base común, se exige que toda magnitud sea expresada en términos de magnitudes que definan las propiedades mecánicas de este sistema material. Así, debe imaginarse la constitución de este medio para que sus propiedades mecánicas puedan simbolizar todas las leyes de la óptica. El color se simboliza por el periodo de un movimiento vibratorio propagado en el medio; la intensidad por la fuerza viva media de este movimiento; las leyes de propagación, de reflexión y de refracción resultan de aplicar a este medio teoremas de la elasticidad.

Podemos entonces decir que en el mecanicismo las magnitudes están predeterminadas porque se asume un sistema mecánico como el prototipo, como lo ontológico. Luego, los mecanicistas plantean una relación natural entre la noción física y la propiedad mecánica, de tal manera que la magnitud es el reflejo de una realidad. Así, para el enfoque mecanicista existe un orden real, natural, una realidad objetiva independiente del sujeto. Las teorías mecánicas de la materia expresan todas las propiedades en términos de magnitudes extensivas, identificadas con un carácter espacial, geométrico.

Para Roldán, Ben-Dov y Guerrero los mecanicistas se refieren a una realidad en sí. Los objetos tienen propiedades que pertenecen a ellos independientemente de los sujetos, de su observación, son propiedades en sí de los objetos que definen su materialidad. Las cualidades primarias se consideran propias del objeto en sí, por ejemplo, la forma geométrica, la masa, el movimiento; mientras que las secundarias, no pertenecen en sí al objeto, resultan ser una ilusión comparada con la cosa en sí, no son una realidad que existe en el mundo, pues existe solo en el sujeto, tal es el caso de la belleza. La visión de Laplace es concordante con lo anterior, considera un mundo objetivo, que no depende de los sujetos, cuyas cualidades tienen existencia independientemente de los sujetos, de nuestro conocimiento (Roldán, Ben-Dov y Guerrero, 2004).

S. Jaki reconoce que la época de Duhem es secularista y se refiere al contexto mecanicista del momento, en especial, a Abel Rey y su círculo, quienes interpretaban la naturaleza en términos de la física newtoniana, considerándola la más alta y confiable forma de racionalidad (Jaki, 1996). Jaki señala que aquella época científicista exaltaba a Renan: "La ciencia y sólo la ciencia puede dar a la humanidad ese sentido sin el cual no puede vivir, un símbolo y una ley".

Los modelos mecánicos

Maxwell y la mayoría de otros físicos propendían hacia la búsqueda de una base mecánica para sus modelos. Maxwell consideró la posibilidad de explicar la gravedad mediante su teoría electromagnética, pero abandonó porque debía atribuir una enorme energía intrínseca al éter. Otros físicos ingleses revisaron la ley de la gravedad de Newton, basándose en modelos electrodinámicos o hidrodinámicos (Kragh, 1999/2007).

Se procuró entonces construir el mundo a partir de estructuras del éter. Desde esta teoría los átomos eran modos de movimientos de los vórtices del éter. Thomson describe la teoría de los vórtices, que se aplicó a problemas químicos (incluyendo la afinidad y la disociación), el electromagnetismo, la gravitación y la óptica, como "[...] un intento ambicioso de establecer una 'teoría del todo' unitaria y continua basada únicamente en la dinámica del éter" (Kragh, 1999/2007, p. 5). En 1895, la mayoría de los físicos no compartía la teoría de vórtices de los átomos. Estos modelos hidrodinámicos del éter diferían del programa laplaciano de la física, no obstante, se apoyaban en una base mecánica.

Duhem considera que cartesianos y atomistas tratan de revelar la naturaleza verdadera de la materia mediante la disolución de los cuerpos que percibimos y de movimientos ocultos. También se refiere a la escuela neo-atomista

o el enfoque de modelos (Duhem, 1913), que toma como centro la noción de electrón, que retoma con mucha confianza el siguiente método: piensan que sus hipótesis reconocen una visión adivinadora de los que hay más allá de las cosas sensibles, ellos hacen ver los elementos como si cierto extraordinario ultra-microscopio los agrandara hasta que sean para nosotros perceptibles.

Podemos decir que el mecanicismo instaura de manera natural en las causas últimas la realidad física. Desde esta cosmovisión, entonces, se utilizan modelos mecánicos para figurar la realidad[...]. El atomismo de Boltzmann es un ejemplo de mecanicismo.

La escuela inglesa usa modelos, según Duhem, y por ello está dedicada a las explicaciones puramente mecánicas de los fenómenos físicos. Para ellos es necesario hacerse "una representación mental de los fenómenos que suceden realmente" (1906-1914/2003, p. 91). Una representación mecánica imita el fenómeno. Por lo tanto, comprender la naturaleza de las cosas materiales consiste "en imaginar un mecanismo cuyo funcionamiento represente y simule las propiedades de los cuerpos" (Ibídem).

Según Duhem, los cuerpos que utilizan los físicos ingleses para sus modelos son cuerpos concretos, similares a los que nos rodean, sólidos o líquidos, rígidos o flexibles, fluidos o viscosos, estas propiedades son imaginadas por medio de ejemplos sensibles. Asocia la habilidad para el cálculo algebraico con la facultad imaginativa, y considera que tal habilidad es muy difundida entre los matemáticos ingleses.

Para un físico de la escuela de Thomson o de Maxwell no hay contradicción si un hecho es representado por dos modelos distintos, por el contrario, disfruta tal variedad. De tal forma que se admite una variedad de imágenes para hacer referencia a la "constitución de la materia". A modo de ejemplo Duhem expone el éter de Thomson.

El éter para Thomson puede ser un fluido homogéneo, incompresible, sin viscosidad, que llena todo el espacio. Para representar la gravitación que produce la atracción de partículas materiales lanzó, a través del fluido homogéneo, un enjambre de pequeños corpúsculos sólidos que se movían en todas las direcciones a gran velocidad.

También, se retorna al fluido homogéneo e incompresible, pero ahora viscoso como una gelatina.

Las leyes de un mismo grupo para los mecanicistas están representadas, según Duhem, por un modelo. Considera que este modelo puede ser un mecanismo construido por cuerpos concretos o puede ser un mecanismo algebraico. Estos últimos, en vez de estar contruidos con giróstatos, muelles en espiral y glicerina, están organizados con signos algebraicos. En este sentido se comprende la frase de Hertz: "La teoría de Maxwell son las ecuaciones de Maxwell".

Duhem se refiere a la necesidad que tienen ciertos "espíritus" de representar los objetos sobre los que reflexiona. Resalta el elemento geométrico, vinculado a la localización de los objetos en el espacio, que permite construirlos de una manera ideal. Dicho elemento está conformado por configuraciones de los cuerpos, que junto con los cambios, son los componentes que el geómetra puede describir y la imaginación puede representar.

La obra de Maxwell fue importante en la difusión de esta concepción en Francia y Alemania. Hertz desempeñó un papel primordial en ello. Según Duhem, Poincaré dio vía libre a la práctica en Francia de los métodos de la física inglesa, al avalar el trabajo de Maxwell y la física de Thomson.

De acuerdo con Duhem, siguiendo esta concepción de la física imaginativa, como él mismo la llama, la escuela se esfuerza por proporcionar a los estudiantes visiones inductivas y concretas. Según Duhem, cuando Thomson recurre a los modelos mecánicos es para exponer o representar los resultados ya obtenidos. Por ello es que Thomson planteaba que sin los modelos no podría comprender la teoría.

De manera similar, Hertz adelantó una crítica importante, apoyándose solo en los conceptos de espacio, tiempo y masa; no obstante, este tipo de análisis crítico de la mecánica no involucró un deseo de abandonar esta cosmovisión; para Hertz las nuevas versiones de la mecánica la afirmaron: uno de los principales objetivos de la mecánica libre de fuerzas de Hertz era establecer una teoría mecánica del éter electromagnético.

Críticas y dificultades del mecanicismo

Hacia fines del siglo XIX, expone Cassirer, la termodinámica, la óptica y la teoría de la electricidad le plantean a la física problemas que pusieron dudas sobre la existen-

cia de una jerarquía del ser y del saber. Se cuestionó un orden para los fenómenos naturales y se puso en tela de juicio que la mecánica fuera el fundamento de este orden. Se objeta entonces que la misión de la física sea penetrar en la esencia de las cosas. Se ponen en duda los fundamentos, y con ello se critican los conceptos de sustancia y causalidad.

Las reflexiones empíricas no fueron suficientes para conmover la concepción mecánica de la naturaleza, sino que fueron necesarias reflexiones sobre el carácter científico de la mecánica. G. Kirchhoff renunció a la intención de la mecánica de explicar los fenómenos. Según él, el fin y el objeto de la mecánica se restringe a una descripción completa y sencilla de los movimientos operados en la naturaleza.

Duhem anota que la mayor parte de los fundadores de la termodinámica tendieron a hacer de esta una aplicación de la dinámica. Procuran deducir los teoremas de la termodinámica de los teoremas de la mecánica racional. Esta propuesta tiene éxito respecto al principio de conservación de la energía; pero tanto el dinamismo newtoniano como el mecanicismo puro cartesiano e incluso las más complejas teorías mecánicas no logran dar cuenta del segundo principio (Duhem, 1987).

Mientras las leyes de la mecánica son reversibles, o simétricas en el tiempo, la segunda ley plantea un cambio irreversible en la entropía. Boltzmann creía haber reducido la segunda ley a principios mecánicos, lo que generó controversias. Según Kragh, E. Zermelo, basado en el teorema de recurrencia de Poincaré, argumentó que la segunda ley no podía derivarse de la mecánica, era incompatible con una imagen mecanicista. Boltzmann no admitió un desacuerdo entre la mecánica y la termodinámica.

Poincaré y Rankine son, según Duhem, los autores más interesados en mostrar la incompatibilidad entre la termodinámica y la dinámica. Los energetistas, en cabeza de Rankine, empiezan el cuestionamiento al mecanicismo. Esta oposición apunta a la autonomía de la termodinámica y busca hacer de la mecánica un caso particular de una termodinámica general. Por su parte, para los alemanes Georg Helm y Ludwig Ostwald, la energía era el más importante de los conceptos unificadores de la física.

La propuesta de Duhem se enmarca en una crítica a la explicación mecánica del universo (Duhem, 1911), que podría denominarse una física de imágenes, y designa su trabajo como una respuesta a la crisis de fundamentos de la mecánica racional. Por ello adelanta una revisión a la mecánica racional, la mecánica química y la termodinámica.

La exclusividad mecánica y el sustancialismo

En muchos sentidos, dice Kragh, la energética resultaba contraria a la cosmovisión mecanicista y se enjuiciaba lo que se denominó “materialismo científico”. Duhem considera que la mecánica racional es una reducción, en cuanto concibe las propiedades físicas como combinaciones de figuras y de movimientos. De tal manera que Duhem cuestiona el objetivismo mecanicista al reflexionar en torno a la certitud del conocimiento desplegado desde esta cosmovisión. Esta crítica de Duhem toma como punto de referencia la física cartesiana (esta indagación la hace extensiva al nuevo cartesianismo), ubica allí un primer contexto desde el que las cualidades son negadas como posibles objetos a analizar. También Helmholtz, dice Duhem, hace una crítica a los físicos ingleses por el éter cartesiano.

Duhem considera que desde esta perspectiva se reduce la física a matemáticas, se restringen a lo cuantitativo, a los números, de aquí que toda noción cualitativa sea rigurosamente rechazada. Todo es reducido a las categorías privilegiadas: la extensión y el movimiento local, es a ellas que se deben reducir todas las aparentes cualidades que afectan nuestros sentidos. Podemos afirmar que cualidades como la gravedad, el calor, la luz y la electricidad se sustancializan: “Así, toda la ciencia se reduce a una especie de aritmética universal de la que está radicalmente desterrada la categoría de cualidad” (Duhem, 1906-1914/2003, p. 148).

Podemos afirmar que la negación de las cualidades por el mecanicismo implica la negación del sujeto en cuanto a su sensibilidad. Desde el realismo cartesiano se considera que existe algo externo e independiente al sujeto: la materia en su dinámica propia, es decir, con posibilidad de movimiento.

Roldán, Ben-Dov y Guerrero ubican las raíces del reduccionismo mecanicista en la visión de Laplace y en la actualidad tiene eco, por ejemplo, en la física de partículas. Este reduccionismo es denominado por los autores *monismo conceptual o filosófico*, y por considerarse que lo que se describe es la realidad en sí, los autores lo llaman *monismo metafísico*. Otro aspecto que plantean estos autores para el mecanicismo es el carácter no “antrópico”, que consiste en la división estricta entre el observador y lo observado, en donde el sujeto se reduce a una mera contingencia, a algo que no es necesario para el entendimiento del mundo, porque lo fundamental para ello son las propiedades de los átomos y sus interacciones. “El reduccionismo sostiene que todas las cualidades típicamente humanas se reducen por completo a las interacciones de la materia” (Roldán et Al., 2004, p. 71).

Duhem no admite una imagen mecánica de la naturaleza, por ello no acepta problemáticas como la de la constitución de la materia (Duhem, 1894). Duhem se niega a reducir la termodinámica a un caso particular de la mecánica y aclara que la teoría de la potencia motriz del fuego de Carnot es independiente en sus postulados a la mecánica racional; señala que quienes plantean la ley de equivalencia entre el calor y el trabajo subordinan la nueva teoría a la dinámica, en particular al enunciado sobre el trabajo y la fuerza viva (Duhem, 1913).

En el campo de la termodinámica, las disquisiciones relacionadas con la segunda de las tesis fundamentales de la teoría del calor y con el concepto de la entropía hicieron que la diferencia entre los procesos reversibles y los irreversibles se considerara, cada vez más, como un rasgo fundamental en todos los fenómenos naturales que no era posible hacer desaparecer por medio de una reducción conceptual.

Paty plantea que a las magnitudes clásicas como aquellas de las coordenadas espaciales, el tiempo, la velocidad, la masa, la fuerza, el momento de inercia, el trabajo, la energía, etc., se suman otras como el potencial, la carga eléctrica, el campo; definidas en el espacio y el tiempo en reemplazo de la “acción a distancia” newtoniana instantánea y que fue difícil de concebir independientemente de un éter, y más tarde, otras más abstractas, por ejemplo, los números cuánticos, el *spin*. Estas magnitudes apelan, en su definición misma, a formas matemáticas variadas como los números, las funciones y las formas diferenciales. Siguiendo las necesidades o las comodidades de sus interrelaciones, estas magnitudes pueden tener la forma matemática de números complejos, vectores, tensores, matrices, funciones de cuadrado sumable definidas sobre los espacios de Hilbert y de los operadores lineales actuando sobre estas funciones, etc.

En este sentido, este autor se refiere a las magnitudes en física que se ponen en juego en las leyes, magnitudes de géneros diversos, de forma cada vez más y más abstracta y alejada de aquella intuitiva y generatriz, de la simple dimensión espacial. El concepto de entropía, introducido por R. Clausius, era una de las más abstractas de estas entidades, que parecen a primera vista más matemáticas que físicas, en este sentido intuitivo. Más que una magnitud interpretable directamente sobre una escala de medida, es relativa siguiendo el tiempo y expresa un orden más que una medida en el sentido de una distancia o de una graduación. Paty dice que Duhem veía en el segundo principio de la termodinámica, es decir, en el aumento de la entropía para los sistemas cerrados, una ruptura con las concepciones mecánicas, porque ella

debe ser formulada de manera abstracta y no intuitiva, casi axiomática. Es posible darles un contenido "intuitivo", después de su introducción, no tanto en la idea de proporcionar un modelo mecánico, sino una función teórica directa en el pensamiento de los fenómenos. De igual forma ocurriría con el concepto, anterior a la entropía, de potencial electrodinámico (Paty, 2001).

La década de 1890 se caracterizó por una tendencia a la teoría electromagnética, de una oposición más importante incluso que la termodinámica y la energética. Muchos físicos teóricos intentaron derivar las leyes mecánicas de las del electromagnetismo por considerarlo más fundamental que la mecánica. El electromagnetismo se consideraba un principio unificador; los electrodinámicos se refieren al éter o al campo electromagnético, de manera similar al papel que se le asignaba a la energía en la energética de Ostwald; de forma semejante hablaban de la materia subordinada a la energía y concebían todos los sucesos como cambios de energía. En ambos casos el materialismo se descartaba y la materia se consideraba un epifenómeno.

La física que surgió durante los primeros años del siglo XX no fue una revolución contra una cosmovisión newtoniana petrificada, pues ya para 1905 la cosmovisión mecanicista había recibido ataques por más de una década. El problema de la física a fines del siglo XIX fue la relación entre el éter y la materia. El punto de vista desde el que se le da primacía a las estructuras del éter se volvió común en el cambio de siglo, cuando los modelos mecánicos del éter fueron reemplazados por electrodinámicos.

No obstante, la cosmovisión etérea de una realidad que no era directamente accesible a los sentidos, no era aceptada por Mach, Ostwald ni por otros fenomenalistas. Según Kragh, los libros de texto de este periodo se fundamentaban en una base mecánica y no reflejaban el cambio de la cosmovisión que se discutía en la física teórica.

En particular Mach, anota Cassirer, combate agudamente la mentalidad de la primera mitad del siglo XVIII que admitía "imponderables" particulares como soporte para cada zona particular de fenómenos: la materia portadora de la luz y del calor, la materia magnética y la eléctrica. Su teoría del conocimiento solo admite la realidad dada por los sentidos (el color, el olor, etc.), estos datos constituyen los elementos fundamentales del ser, sin que detrás de ellos debamos buscar otros. De manera que "todo lo que sale del marco de la comprobación de los hechos transmitidos por los sentidos cae bajo la sospecha de la 'transcendencia', sin que sea posible establecer ya una línea segura de demarcación entre los asertos de la teoría física y los de la *metafísica*" (Cassirer, 1986, p.118).

En la conferencia de 1910 en Königsberg, ante investigadores de la naturaleza y médicos alemanes, plantea Cassirer, Max Planck expuso los motivos que obligaron a la física a cambiar de actitud ante la concepción mecánica de la naturaleza. El lugar principal lo ocupa el problema de la mecánica del éter. La existencia de un éter luminoso material es un postulado de la concepción mecánica de la naturaleza, pero su comportamiento contrasta con el de las demás materias conocidas. Se agotó la posibilidad de llegar a conocer la verdadera constitución del éter luminoso, y dejó de indagarse sobre la naturaleza de este, para examinar críticamente los fundamentos sobre los cuales descansaba la admisión de su existencia.

La causalidad y la explicación de los fenómenos

Duhem muestra que la tarea del físico no es develar el mecanismo de la naturaleza que tiene existencia independiente de él. Plantea que pretender dar una explicación mecánica al universo no es una realidad sino un sueño. Considera que las leyes no se explican, es decir, que no se debe buscar una verdad bajo las apariencias sensibles.

Duhem sitúa esta pretensión explicativa en el campo de la metafísica:

[...] esas dos preguntas: ¿Existe una realidad material distinta de las apariencias sensibles?, ¿cuál es la naturaleza de esta realidad? No son de la competencia del método experimental, ya que ese método solo conoce las apariencias sensibles y no podría descubrir nada que las superara. La respuesta a estas preguntas trasciende los métodos de observación que utiliza la física; es objeto de la metafísica. (Duhem, 2003, p.7).

Duhem no comparte la idea mecanicista de buscar realidades. Plantea que una teoría física está compuesta de una parte explicativa y otra representativa, lo que se le cuestiona a una teoría está en su parte explicativa y los hechos contradicen la intención de captar realidades. Entonces, Duhem considera que las escuelas cartesianas y atomistas plantean un conocimiento hipotético de la naturaleza de las cosas.

Cassirer, por su parte, afirma que si la misión de la física teórica no consiste en penetrar en la esencia de las cosas, sino que, en vez de eso, ha de restringirse a una descripción mediante una clasificación sistemática de los fenómenos, entonces,

No rige aquí ninguna relación *unilateral* de dependencia, como ocurre en la relación de "causa" a "efecto", ninguna relación lógica entre un "antes" y un "después". Reina, más bien, una

simple interdependencia o relación mutua, que encuentra su expresión más simple en el concepto matemático de la función. Una vez que se reconoce el concepto físico de la fuerza como un simple caso específico del concepto de función, desaparece la necesidad de conferir a las fuerzas mecánicas una posición especial cualquiera y de tratar a los fenómenos del movimiento, en cualquier sentido, como “más conocidos” o “más simples” que cualesquiera otros. (1986, p. 113).

El trabajo de Mach, considera Cassirer, enfatiza en diferenciar entre el postulado de la comprensión causal de la naturaleza y el de su conocimiento mecánico. Anota Cassirer que tanto Helmholtz como Wundt, no establecen fronteras entre estos dos problemas, pues ambos pretendían “derivar los axiomas de la mecánica como simples corolarios del principio general de causalidad” (Cassirer, 1986, p. 114). Según este autor, para Mach la ley de causalidad solo exige que el acaecer tenga un carácter determinado y unívoco; no privilegia ninguna zona de este acaecer sobre todas las demás. Entonces resulta imposible “demostrar el carácter mecánico de toda ‘verdadera’ y rigurosa causalidad” (Ibídem).

Para Mach, el principio general de la causalidad no se enlaza de manera directa al principio de que todas las causas de la naturaleza son causas de movimiento. Este nexo lo tiene con otro principio mucho más general: “el de que el trabajo no puede obtenerse de la nada”, se trata del principio de la conservación del trabajo; en otras palabras, que es imposible la existencia de un móvil perpetuo. Apoyándose en sus análisis históricos Mach plantea que la certeza sobre tal principio no descansa sobre la mecánica, puesto que su validez se estableció mucho antes de haberse desarrollado esta ciencia. De igual forma, sus análisis históricos lo llevan a exponer que los principios físicos “no tienen nada que ver con ninguna clase de *reflexiones* sobre el carácter y las últimas causas de los acaecimientos naturales”. La reflexión y la abstracción en la ciencia no son nunca el punto de partida, sino el de llegada. De manera que se reduce a fórmulas los resultados obtenidos a través de miles de casos concretos. Se concluye, entonces,

“que es falso pretender convertir la concepción mecánica del universo en base de toda la física y en la axiomática de ésta [...] nada nos autoriza ni nos obliga a conceder a esta serie de cualidades una posición privilegiada en nuestra imagen científica del universo” (Cassirer, 1986, p. 115 y 116).

En este contexto es claro que el valor ontológico que se le otorga exclusivamente a las sensaciones y representaciones espaciales, desde el privilegio a lo mecánico, es una suposición metafísica, imposible de ser demostrada.

El fundamento conceptual de la ciencia mecanicista fue objeto de estudiosos de la física y de la filosofía, entre los cuales se destaca Mach y Duhem. Durante mucho tiempo, plantea este autor, los físicos supusieron *a priori* que todas las propiedades de los cuerpos se reducen a combinaciones de figuras y de movimientos locales. De esta forma, las leyes generales que obedecen todas las propiedades físicas corresponden a los principios que rigen el movimiento local, es decir los principios de la mecánica racional.

Los modelos, la exclusividad matemática y la ausencia de experiencia

El fenomenismo que desplaza al realismo de la ciencia física en el siglo XIX, llevó a cada investigador a resolver por su propia cuenta los problemas, imprimiéndole un sello particular a su actitud y producción científica (Cassirer, 1986).

El principio de la conservación de la energía marca un cambio de rumbo en la teoría física. Mientras que Helmholtz procura deducir este principio de la concepción mecánica de la naturaleza, R. Mayer lo sitúa en la equivalencia entre el calor y la energía mecánica, sin preocuparse por la naturaleza del calor. Así como no puede deducirse que la gravitación y el movimiento sean fenómenos idénticos no es posible establecer conclusiones respecto al calor. Por ello Mayer traza una división entre su teoría y todas las hipótesis formuladas por la filosofía de la naturaleza (Cassirer, 1986).

El primer principio parte del principio de la conservación de las fuerzas vivas, como lo formuló en mecánica Huyghens y Leibniz. Luego, no existe ninguna pugna entre energética y mecánica. Es posible derivar del principio de la conservación de la energía los principios mecánicos de la conservación de la fuerza viva y de la conservación de la suma algebraica de las magnitudes del movimiento, en lugar de convertir la concepción mecánica en base de la deducción del principio. Planck optó por esta vía (Cassirer, 1986, p. 120).

Mayer procura entrelazar los distintos procesos naturales, sin cambiar ni desaparecer su cualidad: sus diferencias; se trata de reglas cuantitativas generales, el paso de una a otra zona se efectúa con sujeción a determinadas proporciones numéricas constantes. Lo que establece Mayer son los límites naturales de la investigación humana. La energética es consonante con esta concepción, desde lo epistemológico Rankine es el primero que habla de energética. Propone que la física puede seguir dos direcciones:

Una de ellas consiste en marchar tras los fenómenos para descubrir sus causas y averiguar el sustrato que les sirve de base, o bien detenerse en una clasificación de los fenómenos, para determinar simplemente los factores que les son comunes y las relaciones fijas existentes entre ellos. (Cassirer, 1986, p. 123).

Rankine opta por el segundo camino, porque no se abandona la experiencia ni se recurre a hipótesis que se pueden probar. Aspira a trazar límites con mayor nitidez,

En vez de reducir las distintas clases de fenómenos [...] a movimientos y fuerzas, [...] simplemente inferidos, basta [...] con detenerse en una simple ecuación y llegar a la postre a principios valederos para todos los casos por igual y que representan, por tanto, la última conexión de los hechos a que podemos aspirar. (Cassirer, 1986, p. 123 y p.124).

Helm rechaza la idea de que la energía sea una sustancia indestructible que se mueve de un lugar a otro; por el contrario para él, la energía no expresa más que relaciones:

Para la física teórica general no existen ni los átomos ni la energía, ni ningún otro concepto por el estilo, sino solamente las experiencias directamente derivadas de los grupos de observaciones. Por eso, lo mejor de la energética es [...] que se presta mucho más que las anteriores teorías a ajustarse directamente a las experiencias, y [...] los intentos que se hacen para atribuir a la energía una existencia sustancial entrañan una dudosa desviación de la claridad originaria con que se presentan las ideas de Robert Mayer. (Citado por Cassirer, 1986, p. 124: Helm, "Die Energetik", 1898, p. 362).

J.B. Stallo (Cassirer, 1986) atacó las teorías cinética de los gases y la atomística de la materia. Según él, cuando se piensa no está presente una cosa sino un estado de conciencia: el pensamiento físico involucra solo la descripción y clasificación de esos resultados de conciencia.

Duhem muestra que la tarea del físico no es develar el mecanismo de la naturaleza que tiene existencia independiente de él. Plantea que pretender dar una explicación mecánica al universo no es una realidad sino un sueño. Considera que las leyes no se explican, es decir, que no se debe buscar una verdad bajo las apariencias sensibles.

Desde la física fenomenológica el fenómeno es un objeto de conocimiento físico; ahora se vuelve "una serie de elementos de conciencia y estados de conciencia". No es nuevo que "el objeto de la física no representaba nada absoluto", sino que estaba formado por relaciones. Para Kant, en su *Crítica de la razón pura* (Cassirer, 1986, p. 126), la materia es *substantia phaenomenon*, sus efectos son manifestaciones de los "sentidos externos": Se trata de algo relativamente interior (relativo al entendimiento puro), formado a su vez por relaciones externas.

De otra parte, Mach ve plausible la introducción en física de elementos ideales como parte de los "experimentos mentales" necesarios para construir la física. Para él resulta dudoso que sea lícito experimentar con simples "pensamientos" acerca de las cosas. El sistema hertziano concluye que no es posible desglosar de una teoría de la naturaleza una "pieza integrante" de ella, por ejemplo el concepto de fuerza o el de masa, para buscar el objeto correlativo de ella y poder juzgar, según esto, su validez.

Duhem opta por la teoría electrodinámica de Helmholtz, considera que sus ecuaciones carecen de los paralogismos de Maxwell y que explica todos los hechos de los que dan cuenta las ecuaciones de Hertz y de Maxwell, sin los desmentidos que la realidad opone a estas últimas. "La razón no puede dudar, exige que se prefiera esta teoría. Pero la imaginación prefiere utilizar el elegante modelo algebraico elaborado por Hertz [...]" (Duhem, 1906-1914/2003, p. 116).

Duhem cuestiona a Hertz por considerar que la física matemática es una colección de modelos algebraicos. Señala que este autor acepta las ecuaciones de Maxwell tal y como son, sin examinar las definiciones o las hipótesis de las que se derivan y sobretodo sin preocuparse porque las consecuencias fueran sometidas al control de la experiencia.

Duhem construye argumentos para su postura física. Le da argumentos al lector para pensar de manera diferente sobre las matemáticas, para pensar en una física matemática que permita recuperar al sujeto en su carácter de ser cognoscente, poseedor de una dimensión sensible, obviamente mediada por la razón, pero no reducida a ella. En este sentido la representación desempeña el papel de concretar esta propuesta físico matemática, pues es en la actividad consciente de construir leyes experimentales y de plantear principios que es posible mostrar los diversos intentos de los físicos que propenden a la formalización en física. Y aún más allá, se trata de mostrar que la tarea del físico no es develar el mecanismo de la natu-

raleza que tiene existencia independiente de él, sino de construir esta naturaleza en tanto que fenomenología y organización intelectual de esta, “[...] *la physique, en tant que science, est une pensée*” (Paty, 1988).

Kragh plantea que Mach, Ostwald y sus aliados sostenían que los átomos “no eran sino ficciones convenientes” (Kragh, 2007). Sustentaban que las leyes de la mecánica debían someterse a principios energéticos. El atomismo no se aceptaba, excepto como mera representación mental. Pues planteaban que la creencia en átomos y moléculas era metafísica y que por lo tanto se podía dar cuenta de todos los fenómenos sin recurrir a hipótesis atómicas.

S. Jaki resalta que para Duhem los formalismos matemáticos de la física no les dan a los físicos privilegios para referirse de forma absoluta y definitiva sobre aspectos cuantitativos de las entidades materiales, menos aún acerca de su naturaleza (Jaki, 1996). Quienes usan modelos pretenden representar geoméricamente las propiedades, dice Duhem. La intención es contar con una simplicidad en el número de propiedades. Por ello cuestiona a los atomistas y sus modelos mecánicos.

Según Maiocchi hay una tradición que considera que Duhem repite a Mach. Su oposición al atomismo es identificada con aquella de su contemporáneo. Según este autor, existen diferencias en las epistemologías de estos dos autores, que se exhiben en sus oposiciones a lo atomístico. Para ambos, pero en especial para Duhem, no se combate lo atomístico según el esquema usual fenomenismo vs. hipotetismo, porque Duhem ha argumentado enfáticamente que cada teoría científica es hipotético-deductiva. No tendría sentido, desde su concepción, acusar a la teoría atómica de ser hipotética.

La aversión duhemniana al enfoque atomista se arraiga en su convicción de que se debe rechazar toda teoría que emplee modelos figurativos. Si Mach veía en el uso de la figuración analógica, [...] en la versión maxwelliana, la vía trazada por la investigación científica, él refutaba los modelos atómico moleculares, porque son malas figuraciones. En cuanto a Duhem él refuta toda figuración. Esta posición de Duhem proviene fundamentalmente, de una parte, de su posición muy crítica a la física inglesa, y de otra parte a su gran admiración a la termodinámica de Gibbs. (Maiocchi, 1992, p. 376).

Maiocchi plantea que el modelo inglés exige dar un ropaje material a los símbolos matemáticos, encarnar sus ecuaciones, y que el fenomenismo propone conceptos ligados a la experiencia, lo que es un pilar del positivismo. Según este autor, el problema epistemológico de su nueva termodinámica

es opuesto al del fenomenismo: “No se trata de reivindicar los derechos de la experiencia o de la intuición sensible, suficientemente defendidos por el positivismo y por el modelismo anglosajón, sino de confirmar los derechos de la abstracción” (Maiocchi, 1992, pp. 382 y 383).

En la “*L'évolution de la mécanique*”, en 1903, plantea Maiocchi, Duhem traza la parábola del mecanicismo, que ve alejarse el sueño de descubrir con sus modelos la realidad y se refugia en un modelismo orgánico y contradictorio, característico no solo del mecanicismo anglosajón, sino del programa de Boltzmann. Según Duhem, el empleo de modelos figurativos obliga a la ciencia a ser una forma de instrumentalismo.

Desde su discusión sobre el atomismo en química, Duhem sostiene únicamente que los átomos no existen porque la teoría atomística no es sino un instrumento; en contrapartida, su crítica sobre lo atomístico en física, con la forma que había tomado a principios de siglo a nombre del realismo, propone que si se quiere ser realista no se puede aceptar la teoría modelista figurativa de la nueva atomística.

El atomismo en química se equivocó porque asumía como realidad lo que era solo un instrumento; mientras que el atomismo en física se equivocó por entrar en un modelismo instrumentalista que retardaba la posibilidad de una teoría realista. Por el contrario, la termodinámica generalizada de Duhem evoluciona hacia una ciencia no meramente instrumental, ni realista, ni tampoco hacia una clasificación artificial, sino hacia una clasificación natural. A esta convicción Duhem permaneció fiel toda su vida, dice Maiocchi, pese a los triunfos continuos de las concepciones atomísticas. El “*Examen logique de la théorie physique*” (Duhem, 1913), texto que escribe Duhem en los últimos años de su vida, identifica de nuevo una escuela neo-atomista, que emplea el método modelista, y hace una síntesis de sus opiniones sobre el tema durante 20 años.

Maiocchi considera que la postura de Duhem puede ser interpretada de dos maneras opuestas. Uno, como el desprecio de un intelectual engeñucado por prejuicios filosóficos, incapaz de acogerse a las tendencias reales de la ciencia de su época; o dos, se le puede dar un valor profético. Si la crítica de Duhem de lo atomístico en la química no era nada más que una nueva edición refinada de las ideas del siglo XIX, la crítica fundada sobre el análisis del modelismo mecanicista en física tocaba un problema decisivo para los desarrollos teóricos de la física del siglo XX, problema que Duhem veía más claramente que la mayoría de los atomistas.

Maiocchi piensa que es un error oponer el antimodelismo duhemiano a los desarrollos de la física atómica del siglo XX. Esta oposición tiene sentido durante un periodo, pero después pierde sentido. En los primeros años del siglo XX la física atómica es modelista: ella empleó modelos figurativos, con un fin de figuración concreta; así, para Duhem ella es inaceptable, se trata de un mecanicismo de derivación inglesa. En algunos años la física atómica se libera de su dependencia de los modelos para aproximarse a una teoría matemática sin alguna representación concreta sacada del mundo habitual de la física clásica. Este abandono del modelismo figurativo no lleva a una filosofía fenomenista; sigue la vía hipotético-deductiva que Duhem había asignado a las teorías físicas. Este autor recuerda que un historiador de la mecánica y del atomismo (que estudia también al gran adversario de Duhem, Boltzmann) como R. Dugas (Maiocchi, 1992; Dugas, 1935) sustenta, en 1937, que la mecánica cuántica era una teoría conforme a los preceptos epistemológicos de Duhem. Según Maiocchi la creencia tan extendida de que la epistemología duhemiana es incompatible con la mecánica cuántica se funda sobre una falsa interpretación de la idea de modelo. Es verdad que dentro de las versiones más avanzadas de la mecánica cuántica se usan ampliamente consideraciones modelistas; pero, se trata de modelos matemáticos y no figurativos: son ecuaciones y no dibujos. El autor concluye:

[...] si bien la oposición de Duhem al atomismo proviene también de sus convicciones metodológicas, los desarrollos de la física atomista después de Duhem desembocan en una teoría que no parece en nada contradictoria con la opinión duhemiana de lo que debe ser una sabia teoría científica. Aquella no fue comprendida casi por nadie, y sobre el plano de la historia, lo que importa fue simplemente el rechazo por Duhem de la teoría atomística, rechazo que pone la comunidad científica a olvidarlo. (Maiocchi, 1992, p. 389).

Brenner plantea que desde la lógica se encuentran límites. Por ejemplo, frente a la multiplicación de modelos dispares de la forma de la física inglesa, Duhem, como partidario de una física unitaria, invoca la lógica y hace un llamado al sentido común: la incoherencia teórica se condena porque la física no es simplemente un instrumento (Brenner, 1992).

Boyer resalta de Duhem que las hipótesis mecanicistas y atomistas no pueden ser probadas sobre la base de la experiencia. Ellas son instrumentos heurísticos, pero no un privilegio metafísico: "Duhem muestra que los sabios materialistas, lejos de ser fieles a su profesión de fe laica y positivista son metafísicos que se ignoran" (Boyer, 1992, p. 317).

Según Maiocchi, entonces, la nueva teoría unitaria de Duhem se opone a la física inglesa, ella también nueva, pero incoherente. La nueva energética propone un ejemplo de teoría científica matematizada, pero no modelista. Desde aquí, los principios no se fundan sobre cualidades hipotéticas de la materia y las leyes experimentales son el único material sobre el cual la física teórica puede trabajar; ellas tratan propiedades fenoménicas, y es condenada la pretensión de desaparecer las cualidades fenoménicas por reducirlas a la pura cantidad con la ayuda de estructuras hipotéticas ocultas (Maiocchi, 1992).

Brenner resalta que para Duhem lo que el físico consigna en su informe de una experiencia son conceptos teóricos, que no recubren realidades concretas directas (Brenner, 1992). Siguiendo la misma línea de Hertz, Henri Poincaré en sus obras investiga la naturaleza de los procesos de formación de los conceptos y las hipótesis en las ciencias de la naturaleza (Cassirer, 1986, p. 135). Poincaré trata acerca del sentido de las hipótesis matemáticas, quería demostrar, a la luz de las geometrías no euclidianas, que la construcción de un sistema de axiomas matemáticos no se vincula con la experiencia, no podemos, de acuerdo con ella decidir cuál de los distintos sistemas posibles lógicamente, corresponde al espacio "real", por lo tanto, la experiencia no decide sobre la "verdad" de una geometría. Ninguna geometría es "más verdadera" que otra; en cambio se opta por la "más cómoda" según los fines de la experiencia, se trata de indagar por el "instrumento de conocimiento más útil para la descripción sistemática de los conjuntos de hechos que le son dados" (Cassirer, 1986).

Esta libertad sobre la creación de conceptos y de hipótesis se extiende a la física que, en la medida en que se considera teórica, usa las matemáticas y adelanta el mismo tipo de conocimiento que ellas. El hecho científico de la física se distingue del hecho en bruto en que no se limita a los datos de la percepción, sino que los expresa en el lenguaje de los símbolos matemáticos (Cassirer, 1986, p. 136). Los axiomas de la física no describen los hechos sueltos, tal como nos lo ofrece la experiencia. Todo principio físico debe su nacimiento a una sugestión de la experiencia. Pero no se puede derivar de aquí su grado de generalidad. La elevación a principio general es un acto libre de nuestro pensamiento físico. Poincaré y Hertz coinciden en este punto, las imágenes que nos formamos de los objetos exteriores no dependen solo de la naturaleza de estos objetos, "sino que deben su forma 'a la lógica propia de quien las formula'" (Ibídem). Esta lógica plantea una concepción distinta y más rigurosa de los fenómenos que la que nos indica directamente la observación.

Esta transformación es, según Poincaré, el carácter fundamental de todo proceso de formación de las teorías físicas. La física antigua era una física de imágenes: se proponía representar la naturaleza de cada objeto o fenómeno investigado por medio de un modelo mecánico. Los rasgos de este modelo eran considerados como la reproducción de las características y cualidades del objeto y del fenómeno. La física “moderna” es una física de principios: el principio de Carnot, el principio de la conservación de la energía, el principio de la acción mínima, etc.

Un principio no es una agrupación de hechos, ni de leyes sueltas. Lleva implícita la experiencia, “la exigencia del ‘siempre y en todas las partes’, que la experiencia como tal no puede jamás justificar. Lejos de tomarlo de la experiencia, lo empleamos como *pauta* de ella” (Cassirer, 1986, p. 137). Los principios, según Cassirer, son los puntos fijos de apoyo que nos orientan a través del mundo de los fenómenos. No son aserciones acerca del comportamiento empírico de las cosas, sino “máximas” mediante las cuales interpretamos este comportamiento, para reducirlas a una unidad. Poincaré enfatiza en que la elección de los principios es una decisión libre del pensamiento teórico.

Las relaciones que expresan están sujetas a la comprobación constante de la experiencia, y es esta la que se encarga de afianzarlas en su validez objetiva. Solo el *lenguaje* de las teorías físicas y de los símbolos que en ellas empleamos se revela como un elemento variable. Su mutabilidad no excluye la continuidad y la trabazón lógica de las teorías, sino que, lejos de ello, se acredita como un medio para mantenerlas en pie.

Para finalizar, anotemos que la crítica de Duhem al mecanicismo la lleva al campo de la enseñanza. Considera que es importante tener capacidad para resolver problemas no mecánicamente. Se trata de recuperar la función del pensamiento:

La enseñanza superior está ya contaminada por el utilitarismo, y la enseñanza secundaria es víctima de esa epidemia. [...] se hace tabla rasa de los métodos que hasta ahora se habían utilizado para exponer las ciencias físicas; se rechazan las teorías abstractas y deductivas; se hacen esfuerzos por proporcionar a los alumnos visiones inductivas y concretas; ya no se introducen en los espíritus jóvenes ideas ni principios, sino números y hechos [...] creen formar hombres prácticos enseñándoles tan solo cosas concretas, les anunciamos que sus alumnos serán a lo sumo peones rutinarios, que aplicarán mecánicamente fórmulas que no comprenden, ya que únicamente los principios abstractos y generales pueden conducir al espíritu a regiones desconocidas y sugerirle la solución a dificultades imprevisibles (Duhem, 1906-1914/2003, pp. 119 y 120).

Física duhemniana

Carácter holista

Multiplicidad vs. reduccionismo: la generalización

El carácter holista de la propuesta en física de Duhem es contrario a la cosmovisión mecanicista. Mientras el holismo es multiplicidad, el mecanicismo es reduccionismo por su privilegio a los fenómenos mecánicos. Reconoce y valida aspectos distintos a lo matemáticamente, visto desde una mirada mecánica geométrica, a la cantidad, la cualidad. Así, desde la perspectiva de Duhem no solo los fenómenos mecánicos son abordados, sino también los térmicos, magnéticos, eléctricos y químicos. Para este propósito, propone una interpretación y una *extensión* conceptual de las categorías de la mecánica, consideradas por él como fundamentales para una imagen del mundo físico más general.

Para ello, Duhem instaaura categorías más generales como la de magnitud, y con ella la de medida, no restringida a las denominadas magnitudes extensivas, propias de la mirada mecánica, sino que al dar cabida a la cualidad de manera autónoma se da posibilidad a las denominadas hoy intensivas, entonces se cuenta con una noción de magnitud que involucra tanto la cantidad como la cualidad. De igual forma, el cambio ya no será exclusivamente de lugar, sino que abarcará también los aspectos ligados a la cualidad, se tendrá entonces la concepción de un cambio general o cambio de estado. Desde aquí el movimiento local es entendido solo como una clase de cambio más; ya que es posible concebir cambios de otras propiedades sin que haya cambio local necesariamente.

El cambio en Duhem tiene un significado más amplio que el de cambio de lugar, su intención es mostrar que la “ciencia de los movimientos” ya no es, desde un orden lógico, la primera de las ciencias físicas, sino solo un caso particular de una ciencia más general que abarca todas las *modificaciones* de los cuerpos:

Se comprenderá mejor que el cambio de lugar en el espacio no es una modificación más simple que el cambio de temperatura o de cualquier otra cualidad física; se huirá entonces más fácilmente de lo que ha sido hasta aquí el más peligroso obstáculo de la física teórica, la búsqueda de una explicación mecánica del Universo. (Duhem, 1894, p. 285).

Duhem denomina cambio de estado al movimiento general o modificación, este incluye no solo el cambio local como lo contempla la mecánica clásica, sino que involucra los cambios de cualquier cualidad; por ejemplo, la tempe-

ratura; los cambios involucran también lo químico, lo eléctrico y lo magnético (Duhem, 1913). Restringe a los movimientos proporcionados desde una física experimental, es decir, a las *propiedades observables* que los aparatos miden, los aparatos y los sentidos, "son estos datos inmediatos de la observación y de la experiencia que serán capturados por sus fórmulas" (Duhem, 1913, p. 74).

El esquema que procura constituir Duhem es simple, en la medida en que se involucra la mayor cantidad de propiedades posibles, sin elegir unas como las fundamentales para reducir las demás a estas; en cambio, establece la simplicidad desde la organización de las leyes. A través de las leyes se organizan las propiedades: se instauran fenomenologías. Las leyes dan contexto a las propiedades (Duhem, 1911), ya que en este proceso una propiedad adquiere sentido físico al teorizarse, es decir, cuando se representa mediante una magnitud en los procesos de medición. Se intenta, entonces, incluir unas leyes en otras: representar un conjunto de leyes. Lo que implica establecer vínculos entre campos fenoménicos distintos: correlacionar efectos diversos, mediante el establecimiento de nuevas fenomenologías.

Duhem proporciona una física más general que la mecánica racional, sus nuevos principios son más amplios que los de la estática y la dinámica. Para ello, Duhem generaliza los axiomas de la antigua mecánica y los axiomas de la reciente termodinámica.

La unificación

Esta propuesta global se ubica en el contexto de unificar termodinámica y mecánica. La reducción mecanicista es desplazada por una mirada global, centrada en el concepto de *energía*. Así, se incluyen desde el mismo punto de vista distintos fenómenos y no solo los mecánicos y se establecen entre la variedad relaciones aspectos comunes que llevan a una organización que da cuenta de la totalidad.

Según Maiocchi, para Duhem el ideal de científicidad proviene de los desarrollos de la termodinámica y en particular del nacimiento de la mecánica química, después de la formulación que Gibbs ofrece de los principios de la termodinámica. Duhem vio en la mecánica química la demostración de que la termodinámica se convertía en una teoría más amplia que la mecánica, capaz de unificar sectores de la experiencia que aparentemente estaban separados, como los fenómenos mecánicos, térmicos, químicos; una teoría capaz de ampliarse a un campo experimental más amplio. Para Duhem era la realización más completa del programa de la energética, esbozado por Rankine y realizado en lo que concierne a la química por Gibbs y la escuela de Sainte-Claire Deville (Maiocchi, 1992).

Angèle Kremer-Marietti comenta que para Duhem la termodinámica es una rama autónoma de la física, con leyes propias, suficientes para organizar una teoría general relativa a un grupo determinado de fenómenos. La ambición de Duhem por una termodinámica generalizada corresponde a la de un teórico de la física, a la de un físico, en cuanto quiere unificar el conjunto del dominio físico. La autora considera que por clásico que sea el proyecto unitario de Duhem, se trata de la obsesión de científicos de todos los tiempos, incluso los más modernos. De aquí viene la crítica duhemiana a la escuela inglesa, porque para Duhem esta última tiene multiplicidad de modelos (Kremer-Marietti, 1992).

La física como sistema

La energética de Duhem pretende ser un sistema lógico que proporciona una imagen de las leyes experimentales. Por lo tanto se plantea una adaptación entre el sistema y el conjunto de leyes físicas. Esto es posible gracias a la formalización.

Así el sistema es visto como una clasificación. Que adquiere un carácter natural en la medida en que ordena muchas leyes, en principio inconexas. Duhem se apoya en Pascal, quien plantea que sus teorías son una imagen, cada vez más clara y fiel de un orden real. Se puede adicionar que en el rasgo natural del sistema se nota la posibilidad de prever resultados de experiencias aún no realizadas o de plantear leyes experimentales posibles:

[...] reconocemos en la teoría una clasificación natural, si creemos que sus principios expresan relaciones profundas y auténticas entre las cosas, no nos sorprenderá ver cómo sus consecuencias preceden a la experiencia y provocan el descubrimiento de leyes nuevas; en un gesto atrevido apostaremos a su favor [...]. Y cuando la experiencia confirma las previsiones de nuestra teoría, sentimos que nos reafirmamos en esta convicción de que las relaciones establecidas por nuestra razón entre nociones abstractas corresponden realmente a relaciones entre las cosas. (Duhem, 2003, p. 27).

Por lo tanto, se plantea una relación indisoluble entre lo fenomenológico y lo estrictamente teórico, referirse al sistema óptico implica no solo la fenomenología óptica, sino también el conjunto de proposiciones teóricas ligadas a este contexto. Así se hablaría del sistema de la emisión de Newton, Laplace o Biot; o se podrían establecer diferencias entre los sistemas de Newton y de Ampere. Para Duhem:

La física no es una máquina que se pueda desmontar; no se puede probar cada pieza aisladamente y esperar, para ajustarla, a que su solidez haya sido minuciosamente controlada. La ciencia física es un sistema que hay que tomar entero; es un organismo

del que no se puede hacer funcionar una parte sin que las partes más alejadas entren también en juego, unas más y otras menos, pero todas en cierto grado. Si en este funcionamiento surge algún problema, alguna dificultad, el físico deberá adivinar, a través del efecto producido sobre todo el sistema, cuál es el órgano que necesita ser corregido o modificado, sin que le sea posible aislar ese órgano y examinarlo aparte. El relojero al que se le entrega un reloj que no funciona separa todos los mecanismos y los examina uno por uno hasta encontrar el que está desajustado o roto. El médico al que se le presenta un enfermo no puede diseccionarlo para establecer su diagnóstico, sino que ha de adivinar el lugar y la causa del mal examinando las alteraciones que afectan a todo el cuerpo. Es a este y no a aquel a quien se parece el físico encargado de reajustar una teoría defectuosa. (Duhem, 2003, p. 247).

La imposibilidad del experimento crucial

El método experimental no puede convertir una hipótesis física en verdad indiscutible, pues nunca se está seguro de haber agotado todas las hipótesis imaginables con respecto a un grupo de fenómenos; el experimentum crucis es imposible; la verdad de una teoría física no se decide a cara o cruz. (Duhem, 1987, p. 163).

Quine identifica en el enfoque de Duhem un carácter holista, se refiere al planteamiento de Duhem que va en contra de la concepción de experimento crucial:

[...] la hipótesis no se refuta concluyentemente porque la categórica observacional sea falsa. Lo que resulta refutado es la totalidad de oraciones, unidas mediante conjunción, que en su momento necesitamos para implicar la categórica observacional. Si nos vemos forzados a desdecirnos de esa conjunción de oraciones, las posibles soluciones no se limitan a la consistente en retirar la hipótesis en disputa; en vez de eso, podríamos desdecirnos de alguna otra oración del conjunto. En esto consiste la importante doctrina que llamamos holismo. Pierre Duhem puso gran énfasis en ella hacia comienzos de este siglo, y no se excedió al hacerlo. (Quine, 1992, p. 34).

Perspectiva fenomenológica

Cassirer sitúa el trabajo de Pierre Duhem en una época de transición y de crítica de lo clásico, del realismo, hacia un fenomenismo. Como se trata de un contexto en el que se discute sobre los fundamentos, hay una proliferación de diferentes modos de ver en física. Para Mach, Planck, Boltzmann, Ostwald, Poincaré, Duhem, entre otros, una teoría física y su aporte, ofrece concepciones distintas, e incluso opuestas. No se trata de un simple cambio de la intención y del diseño de la investigación (Cassirer, 1986).

La teoría es la “adaptación a los hechos” para Mach y Ostwald, plantea Cassirer, y por consiguiente, la simple reproducción de estos. Para ellos:

Una ley física o un principio físico no poseía nunca un valor sustantivo de conocimiento comparable de la percepción directa, ni mucho menos superior al de ella [...]. Las leyes no son sino catálogos de hechos sueltos; los principios, simplemente, registros de leyes. (Cassirer, 1986, p. 134).

Mach, según Kragh, desde 1880 defendió una interpretación fenomenológica de la física, según la cual las teorías y conceptos físicos eran formas económicas de organizar sensaciones.

Duhem proporciona una física más general que la mecánica racional, sus nuevos principios son más amplios que los de la estática y la dinámica. Para ello, Duhem generaliza los axiomas de la antigua mecánica y los axiomas de la reciente termodinámica.

Desde Mach, en la experiencia todas las clases de cualidades están entrelazadas. Existen formas de percepción análogas al espacio, como por ejemplo, los sonidos. Si no se plantean suposiciones metafísicas no susceptibles de ser demostradas, se le asigna, el mismo valor ontológico. Tenemos las mismas razones para una representación sonora que para una espacial. Mach plantea como único camino seguro “permanecer dentro de la órbita de los fenómenos mismos y describirlos tal y como son, en su pura realidad dada” (Cassirer, 1986, p. 116). Sin buscar fundamentos de explicación “no dados”. Propone que la física conozca la interdependencia de los fenómenos, que puede “comprobarse directamente”, sin necesidad de ninguna clase de sustrato hipotético. El espacio y el tiempo no requieren, para su definición ninguna “forma” especial de la intuición, no hay por qué conceder ninguna superioridad sobre los contenidos sensibles: el color, el sonido o la presión (Cassirer, 1986).

Lo que llamamos tiempo y espacio, dice Mach, solo puede ser conocido por nosotros por su interrelación con otros fenómenos. “Las determinaciones en el espacio no son,

por tanto, tampoco, más que determinaciones de unos fenómenos por otros" (Cassirer, 1986, p. 117). Así, Mach enfatiza que en la física actual todo fenómeno es una suma de funciones de otros fenómenos y de ciertas situaciones en el espacio y el tiempo. Concluye que si se representa esto mediante ecuaciones; entonces, cada fenómeno será función de otros fenómenos.

De esta manera la física fenomenológica de Mach se opone a la física mecánica. Boltzmann y Planck rechazan enérgicamente esta concepción y ven en ella una "inadmisible restricción de la idea del conocimiento físico" (Ibídem). Mach eliminó el concepto metafísico de sustancia y con ello, dice Cassirer, descargó a la física de muchos problemas. Para Mach, determinadas ecuaciones o relaciones "(...) representan lo que hay de verdaderamente constante en las cosas(...)" (Ibídem) y en la experiencia puede atribuirse cierta "sustancialidad" a estas relaciones constantes.

Cassirer sitúa el trabajo de Pierre Duhem en una época de transición y de crítica de lo clásico, del realismo, hacia un fenomenismo. Como se trata un contexto en el que se discute sobre los fundamentos, hay una proliferación de diferentes modos de ver en física.

También en contraste con la perspectiva mecanicista, Duhem ve la necesidad, en su física, de establecer relación con la experiencia. Así, reconoce una variedad fenomenológica, siendo los fenómenos mecánicos solo una clase de tal multiplicidad. De aquí que le incomoden los modelos, tanto matemáticos como mecánicos, en tanto se alejan de las sensaciones, de lo fenoménico, de lo físico.

Se comprende que las denominadas *apariencias* desde el discurso mecanicistas adquieren un lugar importante en Duhem, pues se constituyen en el punto de partida y en el referente necesario a la hora de indagar por la pertinencia de las conclusiones teóricas. Lo sensible, las percepciones, y las leyes experimentales no son considerados como apariencias de la verdad que se oculta tras ellas, pues no interesa la indagación por las causas últimas, sino que nuestro conocimiento se limita a los efectos, a lo observable, a lo medible. Aquello que no tenga asidero en la experiencia pierde sentido lógico.

Según Duhem, es necesario cambiar las causas por los efectos para comprender que gracias a los procesos de medida es posible construir las magnitudes físicas; en otras palabras, se tendrá una representación completa del estado del atributo si se conoce el patrón asociado a la cantidad y si, para los diversos estados de la cualidad, es decir, diferentes intensidades, se conoce la escala. Así, la medida permite dar un carácter físico a la magnitud, es a través de efectos que se tiene la fenomenología. Las nuevas experiencias con relación a las cualidades hacen posible extender el campo sensible desde aquello que es geométrico espacial a aquello que es térmico, eléctrico, químico y magnético. Es en este sentido extendido que Duhem hablará de físico y es a partir de esta extensión que la magnitud debe ser significada.

La categoría de *sistema* también cambiará porque las cualidades no se geometrizarán más, no se reducirán más a las propiedades del prototipo predeterminado de los sistemas mecánicos. Desde esta nueva mirada, las propiedades y las magnitudes físicas son las que construyen el sistema; es decir, no hay objetivación a priori, la realidad física es construida fenomenológicamente a partir de relaciones entre los efectos.

De aquí que la indagación por la esencia de las cosas ahora se cambia por "la necesidad práctica de actuar sobre los cuerpos del mundo exterior y de modificarlos según nuestras necesidades" (Duhem, 1903/1992, p. 221). Necesidades que en el terreno de la construcción de las teorías físicas, sin lugar a dudas, resultan ser cognitivas. Las cualidades son identificadas como sensaciones y con ello es claro su contexto físico experiencial:

La sensación de calor que probamos tocando las diversas partes de un cuerpo nos hace percibir una cualidad de ese cuerpo; esto es lo que expresamos diciendo que este cuerpo está caliente. Dos cuerpos diferentes pueden estar igualmente calientes; ellos poseen a una misma intensidad la cualidad considerada. De dos cuerpos, el uno puede estar más caliente que el otro; el primero posee la cualidad considerada con más intensidad que el segundo. Sin profundizar antes en la naturaleza de la cualidad que expresa el adjetivo caliente, sin intentar sobretodo descomponerla en elementos cuantitativos, podemos muy bien concebir que se haga corresponder un número a cada uno de sus estados, a cada una de sus intensidades; que dos cuerpos igualmente calientes sean caracterizados por el mismo número; que, dos desigualmente calientes, el más caliente sea caracterizado por el número más grande; los números así elegidos serán grados de temperatura. (Duhem, 1903/1992, pp. 199y 200).

¿Podría plantearse que la física de Duhem es una generalización de la mecánica? Duhem planteará que usando una misma manera de formalizar, en su caso la forma lagrangiana analítica, es posible organizar los fenómenos termodinámicos, electromagnéticos, químicos y electrodinámicos, en este sentido hay una extensión del campo fenoménico, no se reduce solo al mecánico.

Hadamard plantea que Duhem retoma los dos principios de la termodinámica como hipótesis, al igual que tomó otras hipótesis físicas; de allí infiere efectos en campos muy diversos; llega hasta las últimas consecuencias, confronta con los hechos observados u observables. Considera que todo desacuerdo es una objeción grave contra las hipótesis iniciales y todo acuerdo una confirmación (Hadamard, 1927). Así, Hadamard reconoce que debe haber acuerdo experimental desde la perspectiva de Duhem.

La paradoja duhemina a la que se refiere Stoffel: realismo vs. fenomenalismo, se disuelve cuando se confiere un estatus al fenomenalismo en la propuesta física de Duhem y se deslinda del terreno metafísico. Esta salida fue planteada por el mismo Duhem, al ubicar el realismo en el plano metafísico y el fenomenalismo en el plano de la ciencia; concluye entonces que por pertenecer a planos distintos no pueden compararse ni juzgarse mutuamente sus enunciados. Stoffel también plantea que Duhem utiliza su trabajo histórico para hacer evidente la existencia de una tradición fenomenalista, paralela a la mecanicista.

Referencias

- Boyer, A. (1992). Physique de croyant? Duhem et l'autonomie de la science. *Revue Internationale de Philosophie. Pierre Duhem*, 46(182), 311-322.
- Brenner, A. (1992). Duhem face au post-positivisme. *Revue Internationale de Philosophie. Pierre Duhem*, 46(182), 390-404.
- Cassirer, E. (1986). *Fin y método de la física teórica*. México: Fondo de cultura económica.
- Dugas, R. (1937). La méthode physique au sens de Duhem devant la mécanique des quant. *Revue générale des sciences*, 38, pp. 68-71
- Duhem, P. (1894). Commentaires aux principes de thermodynamique. *Journal de mathématiques pures et appliquées* [4 serie, tomo 10].
- Duhem, P. (1911). *Traité d'énergétique ou de thermodynamique générale*. París: Gauthier-Villars, imprimeur-libraire.
- Duhem, P. (1917). *Notice sur les travaux scientifiques de Pierre Duhem, rédigée par lui-même lors de sa candidature à l'académie de sciences* (mai 1913). En "Mémoires de la société des sciences physiques et naturelles de Bourdeaux, series 7, vol. 1 (1917), pp. 71- 169.
- Duhem, P. (1987). *Prémices philosophiques*. Leiden: E. J. Brill.
- Duhem, P. (1903/1992). *L'évolution de la mécanique*. Paris: Vrin.
- Duhem, P. (1906-1914/2003). *La teoría física, su objeto y su estructura*. Barcelona: Ed. Herder.
- Hadamard, M. J. (1927). L'oeuvre de Pierre Duhem dans son aspect mathématique. Hadamard. *Mémoires de la société des sciences physiques et naturelles de Bourdeaux*[7 serie, cuaderno 2].
- Helm, G. (2000). *The historical development of energetics*. Leipzig: Kluwer Academic Publishers.
- Jaki, S. L. (1996). *La ciencia y la fe. Pierre Duhem*. Madrid: Ediciones Encuentro.
- Kragh, H. (1999/2007). *Generaciones cuánticas. Una historia de la física en el siglo XX*. Madrid: Ediciones Akal S. A.
- Kremer-Marietti, A. (1992). Analyses et comptes rendus. *Revue Internationale de Philosophie. Pierre Duhem*, 46(182), 405-409.
- Maiocchi, R. (1992). Duhem et l'atomisme. *Revue Internationale de Philosophie. Pierre Duhem*, 46(182), 376-389.
- Paty, M. (1986) Mach et Duhem: l'épistémologie de savants-philosophes. En O. Bloch (Ed.), *Epistémologie et matérialisme* (pp. 177-217). Paris: Klincksieck.

- Paty, M. (2001). La notion de grandeur et la légitimité de la mathématisation en physique. En M. Espinoza (Ed.), *De la science à la philosophie: Hommage à Jean Largeault* (pp. 247-286). Paris: L'Harmattan.
- Quine, W. V. (1992). *La búsqueda de la verdad*. Barcelona: Ed. Crítica.
- Rankine, M. (1855). Outline of the science of energetics. *Proceed Of the Philos. Soc. of Glasgow*, (4), [tomo 3].
- Roldan, J., Ben-Dov, Y., y Guerrero, G. (2004). *La complementariedad: una filosofía para el siglo XXI*. Cali: Universidad del Valle, Programa Editorial.
- Stoffel, J. F. (2002). *Le phénoménalisme problématique de Pierre Duhem*. Louvain-la-Neuve: Académie Royale de Belgique, Classe des Lettres.