



Contribuciones desde Coatepec

ISSN: 1870-0365

rcontribucionesc@uaemex.mx

Universidad Autónoma del Estado de

México

México

Cadenas Gómez, Yolanda

Conexiones físicas ente teoría y realidad: la conexión espacial de la física clásica

Contribuciones desde Coatepec, núm. 29, julio-diciembre, 2015, pp. 17-46

Universidad Autónoma del Estado de México

Toluca, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=28145453002>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

## **Conexiones físicas ente teoría y realidad: la conexión espacial de la física clásica**

*Physical connections between theory and reality:  
the spatial connection of classical physics*

**Yolanda Cadenas Gómez\***

Resumen: Este artículo aborda la cuestión de la relación entre las matemáticas y las teorías físicas a la hora de establecer una conexión entre la realidad externa y la teoría que ella describe y representa. Propongo que tal conexión existe, pero en el caso de la física clásica se trata de un vínculo que se realiza por medio de la intuición espacial, no de cualquier tipo de espacio, sino únicamente del espacio de la geometría euclídea que se corresponde con el espacio de nuestra percepción, de tal modo que dicha física logró aportar una descripción representativa de los objetos físicos donde no se dudaba que eran tal como los describía la teoría; se trata del postulado clásico del isomorfismo entre teoría y realidad por medio del ideal del representacionismo pictórico. Un supuesto que condujo inevitablemente a un realismo ingenuo desde el cual no había motivos para dudar que la teoría describía la realidad tal como es en sí misma. Esta situación cambiará totalmente con el advenimiento de la física cuántica.

**Palabras clave:** Realismo clásico, Representacionismo pictórico, Epistemología, Ontología, Intuición espacial

*Abstract: This article discusses the question of the relationship between mathematics and physical theories when it comes to establishing a connection between external reality and the theory that it describes and represents. I propose that such a connection exists but in the case of classical physics is a link that is carried out by means of spatial intuition. But not any type of space but only the space of Euclidean geometry, which corresponds to the space of our perception, so that physical was able to provide a description of physical objects where it is not doubted that these were as described them be theory: it's the classic postulate of the isomorphism between theory and reality through the ideal of the pictorial representation. A course that led inevitably to a naïve realism from which there was no reason to doubt that the theory described the reality as it is in itself. This situation will change with the advent of quantum physics.*

**Keywords:** Classic realism, Pictorial representation, Epistemology, Ontology, Spatial intuition

\* Universidad Autónoma de Nayarit, México, [yolcadenas@hotmail.com](mailto:yolcadenas@hotmail.com)

## I. Introducción

Todo físico se habrá maravillado alguna una vez al percatarse de la extraña relación entre las matemáticas y el mundo natural y al comprobar cómo el formalismo matemático de una teoría física se ajusta a la realidad exterior y a la experiencia.<sup>1</sup> Digo extraña porque no hay un acuerdo unánime de cómo y por qué es posible dicha relación, la cual sorprende tanto a físicos como a filósofos. Desde Pitágoras y Platón hasta matemáticos como Hilbert y Brouwer o físicos como Einstein y Bohr, pasando por los filósofos Descartes, Kant o Bergson, esta cuestión ha sido estudiada y planteada desde muy diversos términos y sistemas argumentativos. Filósofos de la Física, de las Matemáticas, teóricos del conocimiento y metafísicos han dedicado sus vidas a reflexionar sobre ese enigma, el cual compromete tanto a la naturaleza como al pensamiento humano. ¿Cómo es posible que el pensamiento abstracto, que es propio de la disciplina matemática, pueda de hecho coincidir con la concreción de la realidad física? ¿Qué elemento común puede haber entre ambos?

Quizá se trate de una misma *estructura*, si así fuera, entonces la pregunta sería la siguiente: ¿por qué la estructura matemática de las teorías físicas puede corresponderse con la estructura de la realidad natural que estas teorías describen o, al menos, pretenden hacerlo? Dicho de otro modo, ¿qué tipo de correspondencia puede existir entre el mundo exterior y las matemáticas que las teorías físicas utilizan para describirlo? Puede que haya pensadores –tanto físicos como filósofos– que rechacen este planteamiento y prefieran mantenerse en alguna postura no tan comprometida, como en el caso del instrumentalismo o del pragmatismo; sin embargo, el físico francés Louis de Broglie, uno de los fundadores de la mecánica cuántica, expresa claramente:

*pero el científico, que siempre admite más o menos implícitamente la realidad del mundo exterior, puede muy bien pensar, aun cuando tenga bastante espíritu filosófico para recordar siempre que toda ciencia está a nuestra medida, que pueda existir una correspondencia exacta y unívoca entre el mundo exterior y la imagen que llegamos a representarnos. Admitirá entonces que las observaciones o las experiencias efectuadas con suficiente habilidad y precisión llegarán siempre a hacernos conocer con exactitud todas las magnitudes que son necesarias para una descripción completa, si no del mundo material en su integridad, por lo menos de algunos fenómenos que en él se desarrollan. [...] Puede entonces esperarse, y éste es uno*

<sup>1</sup> Cuando en este artículo hablo de experiencia me refiero siempre a la exterioridad de la realidad física en sí misma como el referente de la teoría y, por supuesto, no uso este término como sinónimo de *experimentación*, que tiene un significado completamente distinto.

de los postulados de la ciencia clásica, poder llegar a expresar, evidentemente en lenguaje humano, pero, sin embargo, en forma perfectamente precisa, la evolución en el curso del tiempo de todo cuanto sucede en el espacio que nos rodea (Broglie, 1951: 128-129).<sup>2</sup>

Siglo tras siglo la ciencia física ha ido creciendo y edificándose con la finalidad de conectar teoría y realidad para satisfacer dicho ideal de realismo y descripción física al que se subordinan el resto de los ideales clásicos: objetividad, determinismo y representación pictórica. Por tal razón, una teoría no solo ha de ser predictiva y carecer de incoherencias internas, sino también explicativas, es decir, ha de tener un “contenido físico” desde el que se establezca una correspondencia entre los términos de la teoría y los elementos de la realidad. De momento solo diré que un concepto con contenido físico —o contenido intuitivo— es aquél que no solo tiene un valor predictivo o pragmático; no es únicamente un instrumento útil para manipular la naturaleza pues, además de esto, es capaz de *describir* la realidad a través de aquella correspondencia. Dejaré para después las cuestiones que tal compromiso ontológico del lenguaje de la física plantea del cómo y porqué de esta capacidad, solo diré que tal contenido viene establecido por nociones, también denominadas *intuiciones espaciales y temporales*, que son responsables del tipo de conexión que la teoría mantiene con el mundo objetivo.

Para entender esto en toda su magnitud he de realizar la siguiente advertencia: el formalismo matemático de cualquier teoría científica consta de dos elementos porque el lenguaje de las teorías físicas no es solo cálculo, además de esta sintaxis matemática tiene semántica, en este sentido se dice que es un *lenguaje interpretado con contenido físico* o *significado semántico*; los términos de este lenguaje poseen la capacidad de referirse a entidades extralingüísticas —los objetos físicos—, lo cual conlleva un cierto compromiso ontológico. Ahora bien, para defender un enfoque realista frente a una concepción instrumentalista he partido de dos postulados indemostrables, pues el objetivo de esta investigación no es indagar en ellos. Uno de ellos es un postulado ontológico que consiste en aceptar desde un principio la realidad y la exterioridad del mundo físico; el otro es epistemológico, el cual afirma la capacidad de las teorías científicas de describir y explicar esa realidad exterior y extralingüística. Puede parecer que ambos postulados son inofensivos, pero gracias a ellos es posible hablar de un ideal general de *descripción física realista*, desde el cual la teoría se compromete ontológicamente con la realidad. Esto es ya una tesis muy fuerte porque

---

<sup>2</sup> Las cursivas son mías.

dicho compromiso ontológico exige la *existencia* de una *conexión*—sea del tipo que sea— entre las matemáticas de la teoría y la experiencia de la realidad empírica o externa a tal teoría.

## 2. Matematización de la experiencia (praxis) y de los conceptos teóricos (theoria)

Antes de adentrarme en esta compleja relación—que únicamente plantearé en el ámbito de las ciencias físicas— me detendré en una importante aclaración. La realidad física o natural es solo una de las áreas que conforman la realidad global, la cual está acotada y delimitada por las condiciones propias de una determinada ciencia. La Física, una de las distintas disciplinas del saber o del conocimiento humano, tiene su propio objeto de estudio y conocimiento, el cual no debe rebasar los límites que todo físico reconoce de inmediato: su campo de investigación. Una vez hecha esta obvia salvedad habrá de admitirse que ese campo de estudio de la realidad—que le es propio— ha de estar matematizado; el estudio físico de esa realidad exige que la experiencia que tenemos de ella pueda ser matemáticamente descrita y representada cuantitativamente por las magnitudes, las leyes, los principios físicos y la teoría correspondiente,<sup>3</sup> pero, ¿cómo se consigue esto? La respuesta está en que la matematización de dicha realidad (o experiencia física) se realiza a través de los conceptos físicos. Me explicaré: la estructura de tales conceptos es la expresión lingüística de nuestro pensamiento abstracto porque los formamos en el entendimiento gracias a nuestra capacidad intelectual de abstracción. Este *lenguaje físico*, con sus conceptos, magnitudes, nociones y definiciones, es únicamente el medio del que disponemos los seres humanos para expresar las profundas relaciones entre nuestro pensamiento y el mundo o la realidad externa a él, dualismo que en Filosofía es milenario entre el Yo y el Mundo, entre el Sujeto y el Objeto, y entre Teoría y Experiencia (o “*Theoria*” y “*Praxis*”, en términos aristotélicos).

La importancia que tienen los conceptos físicos es que *parecen* ser capaces de representar lingüísticamente la realidad física o empírica que, por propia definición, es extralingüística; es decir, se trata de la realidad que está más allá del mero término o expresión lingüística, algo que podría describirse como lo hizo el filósofo Zubiri: “realidad allende”. ¿Cómo y por qué estos conceptos pueden adecuarse y ser representaciones de dicha realidad si el lenguaje es solo un medio de expresión de la relación que existe

<sup>3</sup> Existen muchos testimonios de esta cuestión, pero, por citar alguno, mencionaré a John D. Bernal quien realiza esta afirmación: “Cuando llegó a publicar sus resultados [...] la aportación de Newton fue decisiva. Esta aportación consistía en el hallazgo de un método matemático para convertir los principios físicos en resultados calculables cuantitativamente” (Bernal, 2007: 271).

entre aquéllos? Es evidente que el lenguaje no puede ser el elemento en común —puesto que éste no está presente en la realidad—, por tanto, hay que profundizar en él e ir más allá de su estructura lingüística. Si analizamos cualquier concepto físico comprobaremos que contiene una serie de propiedades que definen al objeto al que representa y no son propiedades lingüísticas sino matemáticas, por ello es posible construir magnitudes o parámetros a partir de los conceptos o nociones físicas. He aquí el extremo del hilo del que tiraré hasta llegar al final de la madeja.

Filósofos de las Matemáticas y muchos de los propios matemáticos han estudiado la fundamentación de esta disciplina y por qué puede, tal y como de hecho lo hace, aplicarse a la realidad natural. Tres son las corrientes más importantes —debido a su mayor rigor— de la fundamentación de las Matemáticas: *logicismo*, *intuicionismo* y *formalismo*, no me detendré a analizarlas porque es otro el objetivo.<sup>4</sup> Salvo el logicismo matemático que pretende reducir las Matemáticas a Lógica, el intuicionismo y el formalismo de Brouwer y de Hilbert, respectivamente, reconocen que las “propiedades reales” —expresión del propio Hilbert (1991)— de la Matemática deben contener una “base intuitiva” para que aquellas proposiciones puedan ser aplicadas a la realidad. Dicha base intuitiva se dice en un sentido ligeramente kantiano, en tanto este filósofo alemán llamaba “intuiciones” al *espacio* y al *tiempo*, pero Hilbert no incluye en ellos el carácter apriorístico y transcendental propio del sistema filosófico de Kant.

En consecuencia, si los conceptos físicos se forman siempre a partir de intuiciones, es decir, si son tanto propiedades (reales) de los objetos como construcciones matemáticas en términos espacio-temporales —que pertenecen tanto a la realidad como al pensamiento matemático—, entonces se podría defender la correspondencia entre los términos de la teoría y los elementos de la realidad: tal correspondencia ofrecería la posibilidad de comprender y aprehender el mundo que nos rodea. Dicho esto, el *contenido intuitivo* de las teorías físicas se entenderá como el factor teórico-matemático y semántico que pone en correspondencia a dichas teorías con el mundo externo que describen en función de elementos espaciales y temporales. Esta correspondencia se da entre los términos matemáticos de la teoría —conceptos o magnitudes— y los elementos de la realidad —objetos—, de este modo se alcanza el objetivo del ideal realista descriptivo (comprensión y explicación del mundo), además de la descripción matemática (predicción y cálculo).

No todos los pensadores están de acuerdo con que la conexión entre las propiedades de los objetos y las propiedades lingüísticas de la teoría se encuentre en las matemáticas,

<sup>4</sup> En mi tesis doctoral titulada *Epistemología, Ontología y Complementariedad en Niels Bohr* profundizo en estas corrientes y en otras ideas que aquí, por razones de espacio, no puedo desarrollar.

algunos piensan —como Wittgenstein y los defensores del logicismo matemático— que se da en la lógica; de tal manera que no existe un isomorfismo matemático entre teoría y realidad, sino un isomorfismo lógico. Yo no soy de esta opinión porque, sin menospreciar la importancia de la lógica en tanto estructura de nuestro pensamiento y, por supuesto, del pensamiento matemático, la lógica no es capaz por sí sola de aportar novedades al conocimiento, solo regula el pensamiento en su aspecto formal pero no en el contenido físico o semántico como referente real de las propiedades del objeto físico.

Para continuar con la argumentación que inicié he de advertir que la correspondencia supuesta en el marco clásico es de un tipo determinado que asegura el contenido intuitivo de una teoría postulando dos clases de isomorfismo:<sup>5</sup> uno entre la estructura del lenguaje y la estructura de la realidad y otro entre los niveles físicos.<sup>6</sup> Así, el primer tipo de isomorfismo —en el que profundizaré a lo largo de este artículo porque es la clave del tema que aquí estoy abordando— hace uso del llamado *representacionismo pictórico* de las nociones clásicas para justificar la elaboración de un lenguaje intuitivo propio de las descripciones visuales de aquél en el espacio y en el tiempo —el ideal cartesiano de describir los objetos físicos a partir de *figuras y movimiento*— que describía y explicaba los tres niveles de la realidad física, objetiva o real; una realidad externa y extralingüística. Además, para que estas nociones no pierdan su conexión con la realidad (su contenido intuitivo) han de tener siempre el mismo significado una vez aplicadas tanto al microcosmos como al macrocosmos, describiendo la realidad física de la misma manera, con las mismas leyes, ecuaciones, magnitudes, etc.

El segundo tipo de isomorfismo afirma lo anterior, además es estrictamente propio y característico de la física clásica, ya que no podrá mantenerse en la teoría actual sobre el microcosmos (la física cuántica), pues provocaría una segmentación entre los niveles físicos. Volviendo a la física clásica, gracias al postulado del segundo tipo de isomorfismo, también el ideal de objetividad y la noción de *realidad independiente* conservan su aplicabilidad

<sup>5</sup> El término *isomorfismo* proviene del griego y, literalmente, significa “igual forma o estructura”.

<sup>6</sup> La realidad física suele dividirse en tres niveles o escalas: el microcosmos o nivel microfísico, el mesocosmos o nivel mesofísico y el macrocosmos. El primero se refiere al sector de la realidad correspondiente a la escala de lo muy pequeño, al nivel atómico y subatómico. El segundo realiza lo mismo con el sector correspondiente al nivel intermedio entre lo pequeño y lo grande; es el nivel de la escala humana. El tercero se corresponde con el sector de lo muy grande, del universo, el nivel de las grandes masas, las grandes distancias, etc. El problema actual es que disponemos de tres teorías diferentes para explicar los niveles que, en definitiva, conforman la misma realidad física: el microfísico obedece a las leyes de la física cuántica; la física clásica describe y explica el mesocosmos o nivel humano que se sitúa entre lo muy grande y lo muy pequeño; por último, la física de la relatividad general se aplica al nivel macrofísico del universo. Hoy existe una segmentación de la realidad que impide que se pueda mantener el ideal clásico del isomorfismo, pues no todos los niveles físicos comparten la misma forma o estructura (isomorfismo).

a la naturaleza en toda su plenitud, incluido el macrocosmos, porque se usaban las leyes clásicas de Newton en relación con la gravitación universal y el microcosmos porque se concebía desde el atomismo mecanicista del materialismo clásico que, si bien no podía ser observado ni estudiado por la física clásica, no tenía motivos para sospechar que el nivel microfísico obedeciera a otras leyes diferentes. Por tanto, en la física clásica no hay un cambio cualitativo entre ambos niveles, solo hay una diferencia de grado en función de su tamaño que no pone en peligro la homogeneidad del universo, tampoco hay límites en el conocimiento de la naturaleza, porque si tales límites existieran no se podría llevar a cabo el ideal de descripción completa, ya que se desconocerían absolutamente<sup>7</sup> ciertos datos que bien podrían contradecir nuestros cálculos, introduciendo factores y circunstancias fuera de nuestro control e indeterminables por principio, no solo *de facto* sino también *de iure*, con lo cual el conocimiento que tendríamos del mundo no sería exacto. Una imprecisión así no permitiría la práctica del ideal determinista,<sup>8</sup> sin el cual no puede predecirse matemáticamente el comportamiento causal de la naturaleza.

En definitiva, al ideal descriptivo del marco clásico no le pueden faltar datos, pues perdería consistencia lógica como base conceptual de sus teorías; por tanto, el microcosmos no se puede regir por otras leyes clásicas distintas de las que ya se conocen en las escalas mesocósmica y macrocósmica. Por otro lado, dicho lenguaje posibilita la descripción de los objetos materiales del mundo físico tal como son e independientemente del sujeto que elabora la teoría, porque implica que las propiedades mecánicas de los conceptos de aquella son las mismas que las que poseen realmente los objetos. Con lo cual, objetividad y realismo están unidos dentro del programa racionalista de la ciencia clásica.

Previo al análisis que expondré, he de realizar otra advertencia: la diferencia que manejo entre *concepto* y *magnitud*; las magnitudes se refieren al tipo de *propiedades* que se les puede atribuir a los objetos físicos asignándoles una *cantidad numérica* o bien un *vector* en función de sus respectivas unidades métricas. En tanto que los conceptos se refieren a la *idea* o *concepción* —de ahí el término *concepto*— desde la cual se define *cualitativamente*, empleando un lenguaje no matemático, el estado físico del objeto, el objeto mismo y sus propiedades en función de dicha idea o concepto; además de esto, gracias al concepto en cuestión es posible establecer la unidad métrica con la cual calcular exactamente el valor de la mag-

<sup>7</sup> Es decir, ni siquiera la teoría permitiría la posibilidad de ese conocimiento, aunque solo se trate de una posibilidad teórica sin acceso a él en la práctica.

<sup>8</sup> El determinismo es otro de los postulados o ideales propiamente característicos de la física clásica porque solo puede operar en el marco de esta teoría física y no podrá aplicarse al marco teórico y conceptual de la física cuántica.

nitid física que le corresponde. De esta forma, a los conceptos de *espacio y tiempo* —que son términos cualitativos de nuestro lenguaje cotidiano y, por ello, no pueden ser medidos ni emplearse para preguntar “¿cuánto espacio o cuántos espacios hay entre la ciudad de León y la ciudad de Guadalajara?”— les corresponden las propiedades cuantitativas de *localización espacial y temporal* que sí pueden medirse y calcularse numéricamente, por ejemplo, utilizando las magnitudes de metros y segundos respectivamente; al concepto de *materia* se le asigna la magnitud de *masa inerte y gravitatoria* y el concepto de *energía* define el sentido de todas aquellas *propiedades dinámicas* o energéticas como son la masa, el impulso y la energía del movimiento, llamada *energía cinética* o, en sentido restringido, *velocidad del cuerpo*, entre otras.

Por ello, afirmo lo siguiente: para que toda magnitud tenga un contenido o sentido físico preciso debe ir asociada a un concepto; las discusiones epistemológicas sobre una teoría física se desarrollan en el nivel conceptual *donde se examina qué conceptos son apropiados* para determinada magnitud y cuáles son sus características o propiedades físicas, dado que las magnitudes y propiedades de un concepto como pudiera ser el espacio no son las mismas si una determinada teoría física emplea el concepto de espacio absoluto y otra teoría maneja otro concepto de espacio diferente, como espacio relativo; ambos conceptos de espacio demandan distintas maneras de medición y cálculo, así como también implican propiedades físicas totalmente diferentes. Por ejemplo, las leyes del movimiento de Newton están cimentadas en el pilar del principio de inercia,<sup>9</sup> pero este jamás ha sido observado en nuestro nivel humano, por ello Newton necesitó añadir al concepto de *espacio euclídeo* la característica de absoluto —donde sí es posible aplicar el principio de inercia— para que las magnitudes espaciales, como el metro, la milla, la yarda, etc., mantengan su valor matemático preciso a partir del cual puedan operar sus leyes. En cambio, la física relativista de Einstein requiere que el concepto de espacio sea relativo, ello implica que no tiene realidad objetiva a no ser que se le añada la cuarta dimensión correspondiente al tiempo; solo el concepto de marco espacio-temporal puede poseer objetividad física desde la magnitud mixta de, por ejemplo, km/sg; en consecuencia, este concepto, junto con su correspondiente magnitud, modificó el tipo de geometría —se pasó de una geometría euclídea de tres dimensiones a otra no euclídea de cuatro dimensiones—, donde tal espacio-tiempo es posible, adquiriendo su propio sentido físico o “contenido intuitivo” y donde ya no se necesita el principio de inercia ni que el espacio sea absoluto para poder calcular o medir la posición de un objeto.

<sup>9</sup> Recordemos que el principio de inercia estipula que todo cuerpo en estado de inercia, esto es, de reposo o de movimiento inercial (uniforme y rectilíneo), no cambiará de estado a no ser que intervenga una fuerza externa que le saque de dicho estado.

De acuerdo con la tesis que defiendo, los conceptos físicos fijan las relaciones matemáticas que determinan el comportamiento y la naturaleza del objeto físico al que se aplican. De tal modo que en los fenómenos naturales existen determinadas regularidades matemáticas que los rigen y gracias a las cuales podemos construir conjuntos de leyes cuantitativas que se constituyen en teorías físicas. El reconocimiento de este hecho me permite afirmar que *la realidad natural tiene una estructura matemática*, como ya defendían siglos atrás pitagóricos y platónicos.<sup>10</sup>

Según esta doctrina, el mundo es inteligible —puede ser entendido y descrito— porque tiene una estructura racional, ordenada y armónica que el ser humano puede entender y describir desde la matemática, el número y la geometría. La *razón matemática* es proporción, para comprender el mundo hay que abordarlo desde su armonía, regularidad, sencillez y uniformidad, donde todas las cosas tienen sus proporciones matemáticas; esta idea se oponía a la postura de Aristóteles quien solo concedía al número una importancia intermedia. En cambio, para los platónicos y pitagóricos, la esencia del mundo era matemática y el número era la base de toda ella, incluso de la geometría desde la cual podíamos conocer la estructura de la realidad: *el espacio de la geometría era el espacio real del universo real*. La identidad entre astronomía y geometría, en este caso, era una importante doctrina metafísica: lo que se afirmaba y era verdadero de una, lo era también de la otra. Con este proyecto se trata de reducir las propiedades cualitativas de los cuerpos a cantidades calculables, desde las que poder descubrir las regularidades matemáticas que rigen el comportamiento de aquellos y asignarles las leyes cuantitativas que los gobiernan. El resultado de este proceso fue una experiencia “tamizada” por la teoría, bajo el supuesto racionalista de que solo lo matemático es real. Así, estos conceptos no eran del todo empíricos porque se habían sacado de una experiencia *racionalizada* —modelada por la propia teoría— que se erigió como modelo explicativo de todo lo real. Para ilustrarlo aludiré al ejemplo del concepto de *espacio*, en tanto *espacio absoluto* que únicamente adquiere sentido:

a partir de las mismas leyes del movimiento, considerándolo no con relación a un sistema físico real cualquiera, sino con relación a un hipotético sistema de referencia donde la ley

<sup>10</sup> La idea pitagórica-platónica de la armonía del universo en términos matemáticos ha venido reapareciendo a lo largo de la historia de nuestro pensamiento, produciendo un movimiento matemático de vuelta a los elementos platónicos y pitagóricos como modelo de inteligibilidad (en tanto comprensión y descripción) y modelo de realidad en toda su objetividad. Existe una inmensa cantidad de escritos respecto de la idea de armonía o isomorfía matemática entre el mundo y la teoría o modo de conocer del ser humano. Por mencionar alguna de estas obras, recomiendo la lectura de *El camino a la realidad* de Penrose (2008), pp. 50-60.

de la inercia sería válida. A pesar de las apariencias esto no constituye una exigencia de principio, sino un postulado sobre el mundo físico; en realidad un extraño postulado [...] Extraño postulado, decíamos, porque el Espacio absoluto es una abstracción, una especie de protección al abrigo de la cual nos servimos del *espacio relativo*, definido con relación al Sol y a las estrellas lejanas. El papel del Espacio absoluto no consiste más que en asegurar una base de principio a la Mecánica (Andrade y Lochak, 1969: 21).

Con estos elementos se construye el modelo racionalista de realidad: por medio de las matemáticas podemos descubrir aquella *estructura real*—ordenada y armónica— del universo sin ficciones ni apariencias; de tal forma que las *causas físicas* en este contexto realista de corte racionalista son las *causas reales*; así, las teorías son verdaderas o falsas desde el punto de vista físico en función de este determinado ideal descriptivo realista. Destaca lo siguiente: en tanto haya una matematización de la realidad habrá siempre una base conceptual que regirá el desarrollo de este proceso. No juzgaré la validez o legitimidad de tal proceder, puesto que este procedimiento no es perjudicial a la ciencia; todo lo contrario, es muy fructífero. No obstante, a la hora de comprender una determinada teoría hay que sacar a la luz sus supuestos y su base conceptual para poder reconocerlos como meros puntos de partida, los cuales pueden ser sustituidos por otros y facilitar la aparición de una nueva teoría. La tarea epistemológica consistirá, entonces, en explicitar los postulados para comprender mejor el contenido conceptual de las distintas teorías.

Así pues, si el carácter matemático de los conceptos físicos es más relevante que su carácter lingüístico, y si el mundo natural —la realidad física— también posee una estructura matemática, entonces tenemos el punto de unión en el que convergen las teorías físicas y la experiencia.

### 3. Definición de *estado clásico* de los sistemas físicos

El estado clásico de los objetos o sistemas físicos se define —como es bien sabido— en un espacio de fases que, de hecho, es una construcción abstracta y matemática de dos o más dimensiones, siempre que estas sumen un número par. Este tipo de espacio de fases es el espacio de todos los posibles estados del sistema y en donde, por ejemplo, posición e impulso ( $x$  y  $p$ , respectivamente) son elementos correlativos que representan el movimiento de la materia —de los objetos físicos reales— a partir de funciones diferenciales de

segundo orden o en derivadas parciales.<sup>11</sup> Además, esto puede describirse linealmente, es decir, por medio de una función cuya representación en el plano cartesiano es una línea recta; esta función lineal se puede escribir como  $f(x)=mx$ .<sup>12</sup> En este sentido, gracias a que la evolución de un objeto físico se representa en términos de posición y momento (o impulso) en el espacio de fases y que también puede representarse como una función en el sistema de coordenadas cartesianas, pienso que *mantiene* una cierta afinidad con el espacio de la geometría euclídea, la cual también se representa en un plano cartesiano y que coincide con el espacio de nuestra percepción humana.

Ahora bien, si definir es delimitar –poner límites dentro de los cuales se afirma la realidad de algo, y fuera de ellos no podemos hacerlo–, la definición de *estado clásico* deja fuera<sup>13</sup> aquellos sistemas físicos cuya evolución y comportamiento no pueda ser matemáticamente representado por ecuaciones en derivadas parciales o ecuaciones diferenciales de segundo orden que describen matemáticamente, por medio de una función lineal, fenómenos físicos que se dan en el espacio y el tiempo. De la siguiente manera es tal y como se define la ecuación de la evolución del movimiento clásico, según la notación de Newton:

$$\dot{A} \approx \{H, A\}$$

En donde A es un observable cualquiera que se puede medir; H es el operador Hamiltoniano que representa la energía total del sistema y el primer término de la ecuación  $\dot{A}$  –que es diferente del observable A– es la derivada temporal de una variable, en este caso de A ( $\dot{A} = \_A/\_t$ ).

Aquello es lo que se llama una *ecuación de estructura simpléctica*, en donde A es el estado observable de  $x$ , la variable correspondiente a la posición (también simbolizada en otras ocasiones por la letra  $q$ ) y  $p$  la variable correspondiente al impulso  $-A(x, p)$ –, de esta manera se constituye el *espacio clásico de fases*. Lo cual implica que sus factores son conmutables porque está tratando con magnitudes canónicamente conjugadas en el sentido de Hamilton, de manera que, si alteramos el orden de sus variables  $(x, p)$  al realizar una

<sup>11</sup> Acerca de este método matemático junto con otros que se emplean en la física clásica puede consultarse, por ejemplo, Torres del Castillo *et al.* (2010).

<sup>12</sup> Donde la  $m$  simboliza la pendiente de la recta, cuya inclinación puede ser modificada si cambiamos  $m$ .

<sup>13</sup> Debido a esta limitación, el físico cuántico Niels Bohr siempre propuso una ampliación de los límites del marco clásico para que abarcara también al marco conceptual de la mecánica cuántica y no sustituir uno por otro. Véase Bohr (1988).

operación con ellas para determinar el estado de un objeto físico cualquiera, obtendremos siempre el mismo resultado:<sup>14</sup>

La formulación hamiltoniana involucra al llamado espacio fase del sistema mecánico, el cual es un ejemplo de una estructura simpléctica [...] las transformaciones que preservan una estructura simpléctica, llamadas symplectomorfismos, corresponden a las transformaciones tales que para dos funciones cualesquiera, se obtiene el mismo resultado efectuando primero la transformación y después el paréntesis de Poisson o haciendo las cosas en el orden opuesto. En la mecánica clásica estas transformaciones se conocen como transformaciones canónicas (Torres, 1989: 301, 305).

El término *simpléctico* proviene del griego ‘symplektikos’ y significa que “entrelaza”, “une”, “vincula” o, incluso, “conjuga”. En este contexto físico-matemático de la mecánica clásica aquello que entrelaza o vincula son las magnitudes canónicamente conjugadas, en el sentido de Hamilton, como son, por ejemplo, la posición y el impulso o la energía y el tiempo. Las cuales están íntimamente vinculadas “simplécticamente” porque son necesarias para dar una descripción completa de la evolución continua del sistema físico. Aquí no entraré en el análisis del grupo de transformaciones simplécticas, por ejemplo, en las aplicaciones que conservan áreas ni en la geometría simpléctica, pues todo ello es de una gran vastedad; me interesa resaltar su carácter de conservación de los valores implicados, de continuidad en la descripción completa de la evolución del sistema físico y de conmutabilidad entre los valores de las magnitudes canónicamente conjugadas.

En este espacio de estructura simpléctica —que es más bien un plano de referencia matemático de los sistemas físicos— están representadas todas las variables del movimiento, tanto dinámicas como cinemáticas del sistema en cuestión. Gracias a esta cualidad, a cada instante de la evolución del sistema le corresponde un valor en este espacio de fases; si se suceden varios instantes, a la evolución del sistema le corresponde la yuxtaposición de sus valores respectivos formando un proceso continuo que no solo puede ser entendido como el recorrido espacial de las partículas, pues, además, representa cualquier otro tipo de evolución en este espacio de fases. En definitiva, el espacio de fases es un método

<sup>14</sup> En física cuántica ya no serán conmutables debido a las relaciones del principio de indeterminación de Heisenberg, donde no dará el mismo valor cuando se multiplican las magnitudes canónicamente conjugadas en el sentido de Hamilton como, por ejemplo, si multiplicamos primero la variable  $x$  (o  $q$ ) por la variable  $p$  no dará el mismo resultado que si se multiplica primero  $p$  por  $x$ . Ya no será posible obtener ambos valores simultáneamente con toda precisión.

de análisis muy eficaz a la hora de observar toda la dinámica de un sistema de una vez, puesto que se trata de un espacio que da cabida a todos los aspectos de la dinámica del sistema. En la mayoría de los casos el espacio de fases solo consta de dos dimensiones, en donde se da una representación completa del estado del sistema físico y su evolución en el tiempo, pero también puede ser un espacio de más dimensiones siempre y cuando el número de sus dimensiones sea par.

Para precisar la localización de los objetos materiales, además de todo lo anterior, la física clásica necesitó otro elemento más: dichos objetos se han de explicar desde el modelo corpuscular, porque lo importante de la materia —para una explicación mecánico clásica de la Naturaleza— es que pueda descomponerse en partes atómicas<sup>15</sup> a las que sea posible atribuir, en todo instante de tiempo, una posición bien definida en el espacio euclídeo. Esto se consigue identificando la materia de los cuerpos físicos con la *extensión*, de modo que lo inteligible<sup>16</sup> de la materia es que está compuesta de *partes geométricas* —de nuevo las matemáticas aparecen imbuidas en la propia naturaleza de la realidad física o material— que pueden localizarse en el espacio. De este modo se cumple la anterior condición, es decir, que sea posible atribuir a cualquier cuerpo en todo instante de tiempo una posición precisa en el espacio, pues algunas direcciones corresponden a coordenadas del sistema y otras a las velocidades, de tal forma que el movimiento de la materia puede describirse espacialmente y donde su estado está representado gráficamente por un punto en un plano en función de estas dos coordenadas. He aquí el significado de la noción de Newton acerca de los *puntos-masa* y a partir de la cual pudo dar con una regla que expresaba matemáticamente la evolución de dicho estado a través de una ecuación diferencial.

Con este tipo de propiedades la mecánica clásica conseguía dar una descripción espacio-temporal bien definida de los cuerpos materiales, pues tanto el espacio y el tiempo como la materia se había geometrizado de tal manera que el marco espacial se dividió siguiendo el esquema cartesiano del eje de coordenadas  $x, y, z$ , dentro del cual, a todo cuerpo —o a su componente material— le correspondía una posición y solo una exactamente determinada por los tres números de las coordenadas espaciales. En cuanto al tiempo, será la variable  $t$ , en función de la cual puede medirse el número de *instantes-unidades* que tarda un cuerpo en cambiar de coordenadas, es decir, en desplazarse de un punto a otro del espacio geométrico.

<sup>15</sup> Con las características de indivisibilidad, impenetrabilidad, indestructibilidad, ingenerabilidad e inmutabilidad.

<sup>16</sup> Aquí *inteligible* es en el sentido de *matematizable* y, según el paradigma racionalista de realismo científico de la época, es también *lo real*.

Cuando el movimiento de un sistema físico está completamente determinado en todo momento tanto por su posición como por su velocidad, en física clásica es posible pasar de la aritmética a la geometría —que representan dicho movimiento en sus respectivos campos— y viceversa, son dos tipos de lenguaje matemático que son “traducibles” entre sí. Por ejemplo, si el sistema está definido por una ecuación diferencial de segundo grado (o ecuación cuadrática), entonces puede representarse gráficamente por medio del eje de coordenadas cartesianas, cuya figura geométrica es la de una parábola o función cuadrática. Dado que las magnitudes o variables que definen el estado de un sistema sencillo son su posición ( $x$ ) y su cantidad de movimiento ( $mv$ ), es posible representar su evolución en el tiempo utilizando un sistema cartesiano, donde los ejes son perpendiculares unos a otros y representan dichas variables. Esta es la importancia que tiene dicho plano clásico de referencia para el estudio de la evolución de los sistemas físicos, ya que no es necesario resolver la ecuación diferencial para conocer el estado de tal sistema y basta con conocer su estructura geométrica en un eje de coordenadas cartesianas que permite una descripción determinista y una evolución continua de los sistemas que en él se representan, pues tal eje de coordenadas se corresponde con el espacio euclídeo, plano, continuo y homogéneo. De esta manera, podemos prescindir de tener que resolver la ecuación diferencial de la evolución dinámica del sistema para obtener la información sobre dicha evolución.

He aquí que damos con la esencia de la física clásica porque las ecuaciones diferenciales e integrales del cálculo infinitesimal se corresponden en el mundo físico con la *transición continua* de un estado físico a otro, pasando por todos los estados intermedios de esta evolución. Es decir, representan matemáticamente el movimiento continuo, que es característico de la física clásica, porque tales ecuaciones permiten asignar incrementos o disminuciones infinitamente pequeños a los valores de las magnitudes que intervienen en el curso de los fenómenos y las cuales, no olvidemos, se forman a partir de los conceptos definidos por la teoría en cuestión. Si el valor de tales magnitudes es conmutativo, el estado del sistema puede ser definido exacta y unívocamente en términos mecánicos —cinemáticos y dinámicos— con la misma precisión y simultáneamente obedeciendo al ideal determinista.<sup>17</sup> En la física clásica estos cambios de estado en su posición espacio-temporal se realizaban de tal forma que se podía trazar una *trayectoria continua* entre los

<sup>17</sup> Para la cual, necesitamos conocer los valores precisos de las magnitudes canónicamente conjugadas del movimiento, como son la velocidad o impulso y la posición. De este modo se expresa Bernal (2007: 272): “Mediante el uso del cálculo infinitesimal es posible hallar la posición de un cuerpo en un momento determinado conociendo la relación entre su posición y su velocidad o el índice de cambio de velocidad en cualquier otro instante”. Para una descripción más técnica puede consultarse el artículo de Torres *et al.* (2010), “The action of canonical transformations on functions defined on the configuration space”.

puntos posicionales que recorre el móvil en su desplazamiento, pues no existía ningún impedimento teórico para asignar en los instantes  $t_1$  y  $t_2$  su posición correspondiente en un espacio geométrico:

Con esas reglas y esos relojes se podrá, en todo instante señalado por los relojes, atribuir coordenadas exactas a todo punto material o referir exactamente la posición o la orientación en el espacio de un cuerpo sólido; más generalmente, se podrán representar todos los fenómenos por magnitudes bien localizadas en el espacio y en el tiempo. Se encontrará así la representación habitual de los fenómenos en física clásica; se llegará a concebir el espacio y el tiempo como una especie de cuadro inmutable donde se localizan con exactitud y se desenvuelven inexorablemente todos los aspectos sucesivos del mundo físico (Broglié, 1951: 138).

No solo se trataba de una condición teórica, sino que además esto se correspondía con los hechos observados porque, cuando observamos el movimiento de un cuerpo macroscópico, vemos cómo se desplaza de manera continua pasando por todos los puntos intermedios que componen su trayectoria desde un lugar a otro. Aunque esta coincidencia empírica no era decisiva: lo importante era que lo permitiera la teoría, dado que, por ejemplo, la ley de la inercia no se había observado nunca y, sin embargo, se le consideraba real. Por tanto, aquello que permite a la teoría disponer de *propiedades cinemáticas* (espacio, tiempo y velocidad en sentido restringido) y trazar la trayectoria continua de un móvil a través del marco espacio-temporal es el hecho de tener unos cuerpos reducidos a sus puntos de gravedad, a los que se les puede atribuir una posición bien definida dentro de su trayectoria porque la masa puntual de estos cuerpos coincide matemáticamente con el punto geométrico de la coordenada espacial.

Por otro lado, si aquello que se quiere estudiar son las causas de los cambios, entonces se ha de recurrir a las *propiedades o magnitudes dinámicas* que darán cuenta de la evolución causal de los sistemas físicos y de sus características energéticas o dinámicas. Este problema lo resolvió Isaac Newton, quien entendió el movimiento de la materia a partir de sus relaciones externas en las que intercambia cantidad de movimiento por razones extrínsecas a ella misma: la materia es pasiva, la causa de su movimiento será siempre la aparición de una fuerza que actúa sobre esta materia inerte y que ha de vencer la resistencia de esta a cambiar de estado. La materia se volvió inerte cuando la redujeron a *extensión*, esto es, al espacio geométrico que ocupa en un eje de coordenadas cartesianas: así, la materia carece del movimiento espontáneo y de todo principio activo como causa

de sus cambios; un movimiento espontáneo y un principio activo que sí le atribuía Aristóteles a los cuerpos en su Física.<sup>18</sup> La formulación de la ley de inercia es la expresión de esta pasividad: es la resistencia de todo cuerpo a cambiar de estado, la cual se calcula a partir de su masa inerte.

Entonces, si la causa del movimiento es esta fuerza o energía,<sup>19</sup> las magnitudes que lo miden serán las que aluden al estado evolutivo de estos sistemas como son la energía, en cualquiera de sus manifestaciones —térmica, eléctrica, potencial o cinética— y el impulso (Ft) o cantidad de movimiento (mv).<sup>20</sup> Sobre este tipo de magnitudes físicas, Newton, en su magna obra *Principios matemáticos de la filosofía natural* (2011), construirá su dinámica en la que los movimientos se relacionan con las fuerzas que los producen y cuyos valores cuantitativos se podrán determinar con precisión gracias a la aplicación de los principios clásicos de conservación de la energía y del impulso o cantidad de movimiento.

A partir del siglo XIX el modelo corpuscular (discontinuo) del atomismo físico tendrá que convivir con el modelo de continuidad del electromagnetismo clásico, donde el *espacio* se convierte en un *campo dinámico* de *naturaleza ondulatoria y continua*: todo punto del campo —ya geometrizado y matematizado— posee una intensidad y una dirección, donde la intensidad guarda una relación de proporcionalidad con la energía del campo eléctrico. Con el concepto de *campo* como un continuo —que es una región del espacio geométrico, que también es dinámico porque posee intensidad y energía, que son magnitudes dinámicas responsables del movimiento y sus causas— aparece en otra rama de la física, el electromagnetismo o electrodinámica, este otro modelo explicativo, distinto del atomismo que ofrecía la teoría corpuscular de los *puntos-masa*, desde el que se entendía la naturaleza ondulatoria de todo aquello que no fuera materia como la radiación electromagnética o térmica.<sup>21</sup>

<sup>18</sup> Dicho principio activo consistía en que cada cuerpo se movía buscando su lugar natural.

<sup>19</sup> El término *energía* no se introdujo en la física clásica hasta el siglo XIX; Newton hablaba simplemente de *fuerzas de interacción*.

<sup>20</sup> El *momento* o *cantidad de movimiento* es el producto de la masa de un cuerpo por su velocidad y el *impulso* es la fuerza por el tiempo; ambas magnitudes pueden ser equivalentes —cuando las fuerzas presentes sean constantes— en función de la segunda ley newtoniana del movimiento por establecer la proporcionalidad entre la variación de la velocidad y la fuerza imprimida al móvil. Véase Sánchez (1986), p. 37.

<sup>21</sup> “Pero, para escribir sus ecuaciones, Maxwell se vio obligado a introducir una nueva hipótesis, que era en cierto modo una consecuencia natural del concepto de campo, y esta hipótesis le hizo descubrir una propiedad sorprendente: el campo electromagnético se propaga en forma de ondas. Y cuando a partir de su teoría calculó la velocidad de propagación de estas ondas en el vacío encontró que era de 300.000 Km/s, velocidad de propagación de la luz [...]. A pesar de todo, esta grandiosa síntesis de concepciones tan alejadas de las de Newton no fue acogida sin reticencias. No se impuso verdaderamente hasta que Heinrich

No obstante, pese a las anteriores diferencias, todas las ramas de la física clásica compartían una serie de postulados comunes: la continuidad de las acciones de la naturaleza, el ideal de objetividad y de explicación causal determinista, el representacionismo pictórico y el isomorfismo de los niveles físicos. Esto nos conduce a explicitar algo más del postulado sobre el isomorfismo entre los niveles descriptivos de la física clásica que su marco conceptual asume desde su propia base. Este supuesto se encarga de construir un puente entre los niveles microfísico y mesofísico que el marco clásico necesita para llevar el tipo de descripción clásica a la escala de las partes constitutivas de los cuerpos macroscópicos y, de esta forma, mantener los mismos conceptos físicos en ambos niveles. Porque, una vez entendida la materia de forma discontinua y descompuesta en partes elementales, se ha de postular este paralelismo entre esta y sus constituyentes simples, con el fin de explicar el comportamiento del compuesto material desde el mismo esquema conceptual. Esta extrapolación la realiza suponiendo que no hay diferencias cualitativas entre ellos, por tanto, el microcosmos inobservable se rige por las mismas leyes que el mundo mesofísico de nuestras percepciones, cuyo comportamiento se explica a partir de unas hipotéticas partículas que no vemos ni conocemos directamente, pero que “suponemos” que actúan como lo hace su compuesto mesocósmico porque han de ser la explicación de este. En definitiva y siguiendo a Desiderio Papp (1968), el modelo explicativo del átomo asumió que todo aquello que no conocemos y que no podemos observar se comporta exactamente del mismo modo que aquello que sí conocemos y observamos. Esta era su doctrina de la *unidad del universo*: todos sus niveles unidos en una perfecta similitud entre ellos.

Tal postulado fue el más explícito de todos ellos y se pudo mantener hasta el final de la era clásica porque –aun tratándose de una mera convención– no introducía ninguna incoherencia en el marco clásico; es más, no había ningún motivo físico ni lógico para pensar que lo inobservable fuera distinto de lo observable. Así, este supuesto no solo venía avalado por el sentido común, sino también por el principio de simplicidad y economía del pensamiento en cuanto a leyes y elementos conceptuales de una teoría. Por ello, afirma Reichenbach, en el contexto de la física clásica:

Debemos considerar nuestras afirmaciones sobre los objetos no observados no como afirmaciones comprobables, sino como convenciones, de las que echamos mano por

---

Hertz confirmó las más notable de sus previsiones produciendo ondas (las ondas hertzianas) por medios puramente electromagnéticos y probando que eran tales y como Maxwell las había descrito” (Andrade e Silva y Lochak, 1969: 43, 46).

mor de la gran simplificación del lenguaje. Lo que sabemos es que *si* se introduce esta convención puede trabajarse con ella sin contradicción alguna; que *si* suponemos que los objetos no observados son idénticos a los observados, llegamos a un sistema de leyes físicas válidas tanto para los objetos observados como para los no observados (Reichenbach, 1953: 188).

La circularidad de este postulado es manifiesta pero no gratuita, pues se justifica sobre la base de su necesidad. Es necesario suponer que las partes atómicas comparten con su compuesto mesofísico las mismas propiedades para poder considerar a ambos objetos materiales en el mismo sentido físico, de modo que no se produzca ninguna fisura en la descripción de su estado físico; los conceptos y las magnitudes —ya matematizadas— han de tener el mismo significado o valor físico para que no pierdan su capacidad de calcular y medir, con parámetros numéricos, su conexión con la realidad una vez aplicados a todos los niveles de la realidad física, en especial al microcosmos, porque en esta región de la realidad habitan los componentes “últimos” de la materia, según la física clásica, que dan razón de la naturaleza y del comportamiento de su compuesto material en el nivel humano o mesocosmos, incluso en el macrocosmos. Es importante subrayar la presencia y el significado de este postulado —que, por cierto, solo puede ser aplicado en el marco conceptual clásico— porque es un elemento esencial para defender la conexión entre los conceptos y magnitudes físicas, definidas con un valor matemático, con la realidad física en todos sus niveles.

Por último, en relación con los postulados antes mencionados, el marco conceptual de la física clásica también daba por supuesta la base de la continuidad esencial en la naturaleza y se estableció la incuestionabilidad de las características fundamentales del ideal descriptivo de la física tradicional. Estas características se presentan bajo la forma de tres ideales clásicos —objetividad, determinismo y descripción espacio-temporal o representación pictórica— que pudieron defenderse gracias a los postulados generales de este marco conceptual, también denominado por Niels Bohr como el *marco de la causalidad*.

El marco de la causalidad se basa en el postulado de la “continuidad de la Naturaleza en sus acciones” porque de él se derivará la posibilidad de plantear la noción clásica de observación sobre la que se levanta el ideal de descripción objetiva:<sup>22</sup> la continuidad en la evolución de cualquier sistema físico significa que no existe ningún límite, corte o salto, en la trayectoria de dicha evolución o en el marco del continuum espacio-temporal

<sup>22</sup> Cuyas exigencias pueden ser realizadas porque las ha hecho posibles el principio de continuidad supuesto en todas ellas.

donde se desenvuelve y permite que se realicen observaciones/mediciones ininterrumpidas a las que podamos atribuir siempre y a cada paso un valor numérico —incluso durante un proceso de disminución o aumento *ad infinitum*— gracias al método matemático del cálculo diferencial o infinitesimal. Este método facilita realizar las mediciones de la evolución continua de todo sistema u objeto físico sin la necesidad de hacer intervenir al científico en el acto de observar o medir como “sujeto empírico o epistemológico”, dado que, si así fuera, tal sujeto introduciría cambios en los valores del sistema y, por tanto, provocaría la aparición de un elemento de subjetividad que es totalmente ajeno al ideal de descripción objetiva, el cual estipula que únicamente se está describiendo al objeto en sí mismo sin la intervención, mediación o presencia del sujeto que lo está observando o midiendo y que las propiedades físicas que se obtienen de tal medición “objetiva” le pertenecen en exclusiva al objeto. También supone que los pares de magnitudes canónicamente conjugadas, que dan cuenta de las propiedades geométricas y dinámicas de los sistemas, son independientes entre sí en el sentido de que la medición de una de ellas no altera el valor de su par conjugado correspondiente, de modo que es posible establecer sus valores con la mayor precisión sin que interfiera la una en la determinación de la otra, pues la interferencia puede ser aislada, controlada y eliminada.

Por lo anterior puede darse una descripción geométrica, en términos espaciotemporales, de su estado, a la vez que la explicación causal de dicho estado, cuya conjugación es la condición que establece el *determinismo físico* en el que desemboca el ideal clásico de la descripción completa, convirtiéndose en una exigencia de toda teoría científica la absoluta predictibilidad causal. Además, también consigue un marco realista perfectamente descrito por las leyes y los conceptos físicos entendidos como *representaciones pictóricas* del objeto físico, que avalan el ideal de descripción y explicación física y aportan el fundamento de un espacio geométrico para el materialismo atomista que explica con las mismas leyes matemáticas —universales, necesarias y eternas— la realidad física en todos los niveles, incluso aquello que no podemos observar ni conocer. Un ejemplo de esto fue cuando se aplicó el modelo del “sistema planetario” al interior del átomo: un núcleo muy masivo en el centro atómico, alrededor del cual giran los electrones de manera continua, tal como los planetas orbitan en torno al Sol.<sup>23</sup>

<sup>23</sup> Este modelo desaparece en la física cuántica, en donde los electrones cambian de “órbita” sin seguir una trayectoria continua sino discontinua, realizando el conocido como *salto cuántico*, durante el cual los electrones desaparecen de un orbital para aparecer en otro sin poder seguir, calcular, observar o medir este desplazamiento; por ello, se piensa que lo realiza fuera del continuo espacial. De hecho este modelo se considerará totalmente simbólico porque no lo podemos representar espacialmente.

#### 4. Los conceptos espacio-temporales en la descripción del estado clásico

Todo lo anterior permitía a la física clásica un determinado ideal de *representación pictórica* o *visual* que estaba basado en la noción de *realidad física independiente* y en el ideal de objetividad. Sin embargo, cuando se habla de *representabilidad pictórica* me refiero a una *representación isomórfica* de la realidad física y el esquema matemático de la teoría en función de un marco espacial. Es cierto, como advierte Jammer, que para pintar necesitamos colores, sin embargo, este tipo de representación no tiene nada que ver con los colores ni con cualquier tipo de cualidad secundaria. Por lo general, esta expresión se refiere a un tipo de representación *ostensiva* en el espacio y en el tiempo, la cual implica que la realidad se manifiesta espacio-temporalmente tal como es porque el concepto y el objeto comparten la misma estructura (o forma) espacio-temporal —concepto y objeto son isomórficos en términos espaciotemporales—; de ahí que las propiedades mecánicas de los conceptos teórico-matemáticos se consideren, en física clásica, como propiedades de los objetos reales.<sup>24</sup> Razón por la que la definición de *descripción pictórica* se refiere a una *descripción objetiva* de la realidad física en términos espacio-temporales que permite la evolución del estado de los sistemas físicos en un espacio de fases, o bien, utilizando ecuaciones diferenciales de segundo orden.

No obstante, según las distintas ramas de la física, tal descripción pictórica puede cambiar de matices. En mecánica clásica este tipo de descripción representaba el movimiento de la materia, siguiendo el ideal geométrico cartesiano. Más allá de la mecánica, en física clásica el término *pictórico* se amplía con el modelo de *campo* que introducen los energicistas o energetistas, hasta alejarse de la representación cartesiana de figuras geométricas en movimiento. En otras ramas de la física, como en el caso del electromagnetismo, prevalece el denominado *ideal maxwelliano* de representación pictórica. Este será desarrollado y nuevamente ampliado por Einstein hasta abarcar la descripción geométrica no-euclídea del marco espacio-temporal donde se inscriben los fenómenos físicos. La descripción pictórica se entiende fuera del contexto de la mecánica como la representa-

<sup>24</sup> "It is commonly claimed that classical physics, in contrast to modern physics, provided a visualized model of physical reality. Strictly speaking, this is not true. For as soon as the atom was regarded as endowed with only shape, position, and motion and divested, for example, of color, the methodological gain in intellectual unification was paid for by the loss of visualizability or picturability. In fact, how could a colorless object be «pictured»? If we speak of the «picturability» of Newtonian physics, we use this term in a more «pallid» and abstract sense: we mean that those properties which presumably «do really exist in the bodies themselves» can be presented by geometrical-kinematical models whose colors (and other secondary qualities) are completely irrelevant to the purpose for which they were designed, as, for example, to serve as didactic aids in the instruction of mathematics" (Jammer, 1966: 403).

ción de la evolución del estado físico a partir de la noción de *campo*.<sup>25</sup> En cualquiera de estos casos existe un elemento común que caracteriza a la representación pictórica del marco clásico: los fenómenos físicos, cuya evolución puede representarse en un espacio de fases, también acontecen dentro de un marco espacio-temporal real, en función de lo cual podemos tener una representación espacio-temporal objetiva de aquellos.

Pese a que se hable de una representación espacio-temporal, el factor temporal no es el determinante, sino el del espacio, el cual tiene primacía ontológica sobre el tiempo hasta el punto de eliminar el carácter dinámico de este, espacializando el tiempo para subordinarlo a aquel. Así lo declara Schlick (2002: 42): “Imaginar ‘pictóricamente’ significa representarse en la imaginación las percepciones que uno tendría si observara o retuviera la estructura directamente. Para que esto sea posible, la estructura no ha de ser ni demasiado grande ni demasiado pequeña y, en cualquier caso, debe ser una *estructura espacial*”.<sup>26</sup>

Otra forma de plantear esto es la que realiza González Recio quien, comentando a Schlick, afirma que la ciencia clásica se apuntaló sobre el supuesto de que el significado de sus magnitudes provenía de la imagen sensorial, visual, correspondiente al espacio:

El movimiento parecía ser la clase de proceso donde las exigencias del conocimiento eran satisfechas de una forma pictórica, donde el proceso completo quedaba recogido con plenitud en su representación visual. Este había sido —en opinión de Schlick— el único motivo de la predilección de los físicos por las explicaciones mecánicas, y de los intentos de reducir a ellas los demás tipos de explicación. Ahora bien, *imaginar pictóricamente no es sino concebir estructuras espaciales* (González, 2002: 9).<sup>27</sup>

Estos autores describen claramente que la representación pictórica defendida por la física clásica es, de hecho, una representación espacial —en términos de figuras, diría Descartes—, pero no van más allá; es mi propuesta afirmar que esta representación espacial, por medio de figuras geométricas, es el punto sobre el cual la física clásica presupone su realismo, la capacidad de representar la realidad del mundo físico por medio de las estructuras matemáticas, geométricas, que están imbuidas en su marco teórico. Así, gracias al vínculo de este *representacionismo pictórico* en tanto *estructura espacial* de las nociones clásicas con la realidad

<sup>25</sup> La noción más amplia de *campo cuántico* posee una estructura métrica no-euclídea, aunque en ella puede incluirse la euclídea como un caso ideal.

<sup>26</sup> Las cursivas son mías. Véase también de la página 38 a la 41.

<sup>27</sup> Las cursivas son mías.

extralingüística se pudo tender el puente entre la teoría y la experiencia, desde el cual se elaboró el lenguaje *intuitivo*,<sup>28</sup> que es propio de las descripciones visuales en el espacio ordinario —a las que nos acostumbró la física clásica— a través de la representación gráfica en un espacio euclídeo. Este lenguaje ofrece la posibilidad de describir el estado de los objetos materiales del mundo físico tal como son, independientemente del sujeto que los observa y cumpliendo la demanda del ideal de objetividad, porque se pudo suponer que las propiedades geométricas y dinámicas de los fenómenos físicos son las propiedades reales que los objetos poseen en sí mismos.

Dicho esto, me detendré a explicar el significado de *espacio y tiempo*, que —junto con de los conceptos de *materia y fuerza*— fueron sobre los que se edificó la mecánica clásica y que cumplían una función precisa dentro de la teoría. No se ha de olvidar que la física clásica, incluso la física relativista, no reconocen la naturaleza del tiempo como movimiento constante en sí mismo, sino que se trata de un tiempo espacializado y, en cierto sentido, se podría afirmar que este tiempo, así concebido, contradice su naturaleza al convertirlo en algo más bien pasivo, como cualquier otra coordenada que interviene en la descripción del movimiento. Hasta el extremo en que Einstein llegó a afirmar —equivocadamente, a mi juicio— que “el tiempo es una ilusión”.

El espacio clásico conformaba el marco de referencia *absoluto* desde el que se podía asignar a cada cuerpo su posición exacta; la naturaleza de este marco era continua, razón por la que también nos referimos a él como *continuo espacial* y se le consideraba un receptáculo vacío donde se insertan los cuerpos y sobre los que no produce ninguna alteración en su estado de movimiento dinámico, pues carece de efectos energéticos sobre los cuerpos que contiene. Este era el marco absoluto espacial y temporal de Newton, cuyas partes están yuxtapuestas en el caso del espacio, o bien son sucesivas en el caso del tiempo, pero en ambos eran homogéneas; es decir, no había partes últimas o límites que se diferenciaran del resto. De modo que no había ni principio ni fin: el espacio era infinito y plano, en tanto que el tiempo era un fluir eterno de los instantes temporales, vacíos de acontecimientos. Se trata de un espacio y un tiempo idealizados por las condiciones de matematización —establecidas por la teoría— para poder asignarles una unidad y, así, medir y calcular las características espaciales y temporales atribuibles a los cuerpos; estas son las llamadas *propiedades geométricas* o también designadas *cinemáticas*. La exactitud con la que se puede dar esta localización depende de la precisión con la que se pueda determinar el valor de las propiedades geométricas de los cuerpos, es decir, de la exactitud con la que

<sup>28</sup> “Intuitivo” no en el sentido kantiano de intuición pura, sino en el sentido de intuición empírica.

puedan ser medidas. Por este motivo es importante la matematización del espacio y del tiempo, ya que es lo que permite hacer observaciones cuantitativas al asignarles unidades de medida que es uno de los elementos indispensables para construir una teoría científica.

En tanto que la cuestión está en dar una descripción pictórica, figurativa o visual de los cuerpos, no será la única condición necesaria para cumplir ese objetivo. En el caso de la física clásica, suponía y postulaba que la realidad extralingüística se manifiesta —es ostensiva— en el espacio a través de los conceptos físicos porque el concepto y el objeto —ambos ya matematizados— comparten la misma estructura o forma espacial. De esta manera el objeto puede ser representado geoméricamente y localizado dentro de un marco de coordenadas cartesianas. De ahí la posibilidad de mantener el *isomorfismo estructural* —“la misma forma”— entre la estructura de nuestro pensamiento abstracto y la estructura de la realidad de la física. Por ello, las propiedades mecánicas que son establecidas por los conceptos se consideran también propiedades reales y matemáticas de los propios objetos, gracias a lo cual la descripción que la física clásica daba de la realidad natural pretendía ser una descripción objetiva de esta en términos de espacio y tiempo —un tiempo que, ha de recordarse, ha sido espacializado e incluso geometrizado—. No son términos intuitivos en el sentido ordinario o cotidiano, sino matemática y físicamente intuitivos porque el espacio y el tiempo *absolutos* no son concebibles a partir de nuestras formas ordinarias o habituales de percibir, sino que son conceptos que han sido idealizados y matematizados por la propia teoría clásica para que esta mantuviera su coherencia teórica y su pretensión realista de describir la realidad con base en unos conceptos que pertenecen a la teoría y la realidad externa. La física clásica nos acostumbró a sus conceptos de espacio y tiempo absolutos que a aceptar su realidad, pese a no ser nunca observados ni percibidos, se convirtió en un hábito de pensamiento que se arraigó en nosotros como una estructura tácita extremadamente difícil de combatir.

El transcurso de estas reflexiones obliga a realizar un pequeño alto en el camino para subrayar y no perder de vista la naturaleza del tiempo clásico, a la vez sirve para explicar cómo el espacio absoluto, que no es perceptible por nosotros, se puede ajustar al espacio de nuestra percepción gracias a que aquel puede ser representado geoméricamente en un eje de coordenadas clásico de tres dimensiones.

Si bien la física clásica pretendía que el marco espacio-temporal fuera objetivo —que las propiedades espacio-temporales pertenecían a la realidad externa y físicamente independiente del científico<sup>29</sup>— y que los conceptos coincidieran con ella en dicha estructura

<sup>29</sup> Aquello que Margenau denominó el ideal de “una ciencia sin sujeto”.

espacio-temporal a través de las propiedades mecánicas de los sistemas físicos, también es cierto que el tiempo clásico está espacializado. Dicho de otra forma, dadas sus *características clásicas* de homogeneidad y continuidad entre los intervalos sucesivos, el tiempo clásico está subordinado al espacio homogéneo y continuo del marco conceptual de la física clásica, el cual es el que determina las propiedades del tiempo —que son las mismas, excepto que en el caso del espacio sus partes son yuxtapuestas y en el caso del tiempo son sucesivas—. Si el concepto de *tiempo clásico* es homogéneo y continuo, cuyas partes son sucesivas —reversibles o no— y si además no tiene límites ni partes discontinuas, dado que el tiempo se entiende como un fluir eterno de los instantes temporales y vacíos de acontecimientos, entonces se trata de un tiempo idealizado por las condiciones de matematización que estipuló la teoría clásica para poder asignar a dicho *concepto* una *unidad métrica exacta* —una *magnitud*— para medir y calcular las características temporales de los cuerpos.

En cuanto al concepto clásico de *espacio*, si bien es absoluto, también es de naturaleza euclídea; estas dos diferentes caracterizaciones pueden conducir a errores o a ambigüedades. Por un lado, el espacio clásico en su faceta de ser absoluto no puede ser percibido por el ser humano —Newton nunca supo cómo explicarlo y solo afirmaba que lo necesitaba para que sus ecuaciones del movimiento funcionaran—; este espacio absoluto es el que la física clásica convirtió en un hábito de pensamiento o estructura tácita para que no fuera cuestionado pese a ser una idealización matemática sin referente físico en la realidad o, al menos, un referente que los humanos no podemos observar ni percibir.

El espacio clásico tiene la ventaja —pese a ser absoluto y, por lo tanto, infinito— de poder ser *confinado* en un eje de coordenadas cartesianas que, como es bien sabido, se estructura en tres dimensiones:  $x$ ,  $y$ ,  $z$  (ancho, alto y profundo), lo cual coincide con el *espacio de la geometría euclídea* que se caracteriza por ser tridimensional; esta forma de geometrizar el espacio en tres dimensiones es la que nosotros podemos percibir, pues existen espacios geométricos de más de tres dimensiones que ya no son representables ni visualizables a través de nuestros sentidos o sensibilidad humana. Por lo tanto, esta faceta del espacio clásico que se identifica con el espacio tridimensional de la geometría euclídea facilita las representaciones espaciales de la física clásica en términos de figuras que sí podemos percibir. Este espacio euclídeo, geoméricamente plano y tridimensional, se corresponde con el espacio de nuestra percepción y no el espacio absoluto —continuo, homogéneo e infinito—, dado que solo percibimos el espacio relativo. No obstante, hay espacios no-euclídeos como el de Riemann que se corresponde con el espacio tetradimensional de la relatividad general. Einstein defendió la concepción de un marco espacio-temporal físicamente objetivo ya que su tipo de espacio es cuatridimensional —donde el tiempo

está intrínsecamente unido, como una dimensión más, al resto de las dimensiones espaciales— y puede tener una correspondencia “simbólica”<sup>30</sup> con el espacio euclídeo de tres dimensiones porque pensaba en la geometría de Riemann como una generalización de la geometría de Euclides.<sup>31</sup>

Volviendo a la intuición temporal, he de acentuar que la espacialización idealizada del concepto de tiempo es la razón por la que definiendo que es únicamente *la estructura espacial* la que determina el tipo de conexión que establece la física clásica entre la estructura matemática de los conceptos y la de los objetos. Esta estructura que comparten es eminentemente espacial y la descripción que permite —esta misma estructura espacial— es la denominada *representación pictórica*. Por consiguiente, la tesis que mantengo es que las teorías clásicas defendían su contenido físico desde una conexión eminentemente espacial de los términos lingüísticos —conceptos y magnitudes— con sus referentes objetivos o significados extralingüísticos: los objetos. En este sentido, se dice que el significado de los conceptos clásicos es “pictórico”: representan el mundo físico en términos espaciales objetivos, donde concepto y objeto comparten la misma estructura espacial; dicho de otro modo, los conceptos de la teoría son espacialmente isomórficos con los objetos de la experiencia que están describiendo.

En consecuencia, un análisis detallado del marco conceptual de la mecánica clásica revela que dicho marco asumía la correspondencia entre teoría y experiencia postulando este isomorfismo espacial, de naturaleza o estructura matemática entre lenguaje y realidad. Por ello, en este marco clásico la objetividad espacial es la clave de la conexión entre teoría y experiencia, gracias a la cual los conceptos y magnitudes clásicas conservan una fuerte carga de contenido físico, con sus respectivos referentes ónticos en la realidad en sí misma. Si sumamos a este tipo de isomorfismo —espacialmente matematizado entre

<sup>30</sup> “Simbólica” en un sentido muy distinto al que empleó Bohr en su interpretación de la mecánica cuántica.

<sup>31</sup> “La geometría de Riemann tendrá validez si las leyes de localización de los sólidos prácticamente rígidos se acercan a las de la geometría euclidiana tanto más de cerca cuanto menores sean las dimensiones de la región de espacio-tiempo que se tome en consideración” (Einstein, 1981: 211). Un estudio pormenorizado de esta conferencia se halla en *Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique* (1993), pp. 296-319. Otra referencia más breve a dicha conferencia se encuentra en *Albert Einstein. Vida, obra y filosofía* (1994), pp. 280-283. La razón por la cual es posible para Einstein tener una visualización de su espacio-tiempo tan alejada de la manera como somos capaces de percibir y del marco espacial de la física clásica —de la geometría euclídea— es porque con la ayuda de “las leyes de localización de figuras rígidas” es posible transferir una representación bidimensional de “la geometría esférica sobre el plano” al “ámbito tridimensional de la geometría esférica”; del mismo modo que cuando trazamos sobre un plano un dibujo bidimensional que representa una imagen tridimensional. Ahora se trata de subir un peldaño más y, a partir de la imagen tridimensional, construir mentalmente la naturaleza tetradimensional (Einstein, 1981: 215-219).

lenguaje y realidad— el segundo tipo de isomorfismo entre los niveles de la realidad física, tenemos todo lo necesario para describir los estados clásicos de los fenómenos o sistemas físicos con que se cierra todo el marco conceptual de esta física.

## 5. Conclusión: el espacio como fundamento intuitivo de la física clásica y elemento conector de las Matemáticas con la realidad física

La situación de la física clásica quedó así: desde la representación pictórica de las nociones clásicas se pudo elaborar un lenguaje intuitivo, propio de las descripciones visuales basadas en la intuición espacial; además, dado el segundo tipo de isomorfismo, el significado que aquellas nociones tienen en el nivel mesocósmico puede extrapolarse al nivel de sus constitutivos atómicos para que, una vez aplicadas al microcosmos, no pierdan su conexión con la experiencia o la “correspondencia unívoca” por utilizar una expresión de L. de Broglie. Si se pierde esta conexión, el problema es más grave que el de un “fracaso de la descripción visual”, pues lo importante es que supone un debilitamiento de los compromisos ontológicos de la teoría. Este es el auténtico protagonismo que posee la representación pictórica o espacial, ya que sin ella se pierde la conexión clásica a través de la correspondencia entre las estructuras espaciales de la realidad y de la imagen que la teoría elabora para representárnosla.

Si enlazamos las ideas anteriores se puede obtener la siguiente conclusión: aquellos conceptos básicos que utiliza la mecánica, si bien hunden sus raíces en la experiencia, tuvieron que pasar por el tamiz de las matemáticas de la teoría, hasta hacerse casi irreconocibles por parte de la intuición cotidiana. Por aquel entonces aún no había razones para sospechar que el lenguaje ordinario —debidamente refinado, esto es, matematizado por las leyes físicas que se estaban descubriendo— no fuera capaz de representar con absoluta precisión todos los fenómenos naturales de la experiencia o realidad física que caen dentro del marco teórico de sus leyes.

Bajo el postulado racionalista de los conceptos mecánicos como representaciones objetivas de la realidad, la física clásica pudo establecer que el conocimiento que estos ofrecen del mundo físico es preciso y unívoco, como afirmaba Louis de Broglie en el texto citado al principio del artículo. También de ese mismo texto he tomado la definición de *representación pictórica*: aquélla donde se supone una correspondencia exacta y unívoca entre el mundo exterior y la imagen con la cual llegamos a representarnos dicha exterioridad física en el ámbito teórico. Dicho de otro modo, es aquella representación en el espacio de nuestra percepción, que, al coincidir con el tipo de espacio que maneja la geometría

euclídea, permite hablar de “pintar”, “figurar” o “visualizar objetos en el espacio. Esta representación fue usada para describir geoméricamente el estado clásico de los sistemas físicos y para explicarlo causalmente, desde el determinismo de la física clásica, con base en el proceso de matematización de la realidad y de los métodos matemáticos que se ajustan a ella; se lograba la observación, medición y cálculo exacto de todas las magnitudes físicas, con lo cual se podía llevar a cabo una absoluta y certera predictibilidad de todos los fenómenos clásicos.

Por todo esto, en el marco conceptual de la física clásica el contenido físico en tanto intuición espacial está directamente relacionado —incluso se podría afirmar que se fusiona— con la *representación pictórica* y esta, a su vez, le servía de herramienta a las teorías clásicas para ofrecer su descripción física de la realidad, esa realidad que estudiaba, observaba, medía y calculaba. Gracias a ello, la realidad se podía entender o conocer; este tipo de descripción física permitía un determinado modelo de inteligibilidad —de comprensibilidad, de cómo entender el mundo natural—, el cual solo se conseguía bajo el siguiente supuesto realista: los conceptos teóricos se corresponden con elementos de la realidad física o experiencia; el significado extralingüístico de aquéllos —de los términos físicos— hace referencia siempre al propio objeto, el cual se considera de naturaleza autónoma, independiente y del todo ajena al sujeto que la está estudiando y que, además, posee una estructura espacial que se adapta perfectamente a la estructura matemática de la teoría: los objetos poseen propiedades en sí mismos que se correlacionan con las magnitudes teórico-matemáticas, especialmente las propiedades objetivas y teóricas relacionadas con el espacio. De este modo, dado que el espacio —en su aspecto geométrico— de la física clásica es el espacio de la geometría de Euclides y que esta geometría coincide plenamente con el espacio de nuestra percepción, se pudo considerar que el lenguaje físico es una depuración matemática y teórica del lenguaje ordinario, el de nuestras percepciones.

La física clásica tuvo su ocaso y, a lo largo del siglo XX, apareció una nueva teoría, la conocida *física cuántica*, actualmente, *modelo estándar de física de partículas*. Las leyes cuánticas ya no revelan el futuro de los sistemas ni sus propiedades al modo clásico, sino que rompen la perfecta similitud del macrocosmos y mesocosmos con el microcosmos sobre la que descansa la explicación de los dos primeros; no permiten una noción de observación ajena al acto de medida, tampoco una representación pictórica de los acontecimientos atómicos; no pueden defender, en los términos que establece el marco clásico, un ideal de descripción objetiva ni exhaustiva de los sistemas físicos; ni hablar de estos como sistemas cerrados en el sentido de una “realidad física independiente”. La nueva teoría física es tan distinta de la física clásica que las leyes cuánticas no permiten nada de lo que he expuesto

en este artículo, destronando al espacio como el elemento canónico que vinculaba las matemáticas de la teoría con la experiencia o realidad externa.

La causa de tal desmoronamiento fue la irrupción, en 1900, de la idea de *discontinuidad* en el horizonte de la física a través de la noción de *cuanto*, que sustituirá al ideal clásico de *continuidad*. Las leyes cuánticas solo expresan “las variaciones en el tiempo de las probabilidades y que se refieren a conjuntos o agrupaciones de un gran número de individuos”, tal como afirman Einstein e Infeld (1993), quienes realizan esto haciendo tambalear los firmes cimientos de la física clásica porque el fracaso de los tres ideales clásicos conlleva la aparición de los tres problemas fundamentales —determinismo, objetividad y contenido intuitivo— que la física contemporánea plantea al realismo científico y a los que Bohr intentará dar solución.<sup>32</sup>

Si bien algunos físicos, sobre todo durante los primeros pasos de la nueva física, consideraron que se trataba de una teoría incompleta, subversiva, irracional y, en definitiva, inaceptable científicamente, en la actualidad dicha física demostró que es matemáticamente consistente, lógicamente coherente y experimentalmente da una explicación de todos los fenómenos físicos que caen bajo su campo de aplicación. El único problema que enfrenta es de naturaleza epistemológica porque es una teoría que se aleja de las formas con que el ser humano percibe, describe y entiende la realidad que algunos físicos y filósofos se preguntan si es una teoría completa y realista capaz de ofrecernos una imagen de la realidad física. No me encuentro entre aquéllos porque, a mi juicio, sí es una teoría realista aunque no facilita una *imagen* de la realidad porque, en esta nueva teoría física, la noción de *espacio* desaparece como el elemento que conecta el formalismo matemático de la teoría con la realidad física y, por ello, no podemos visualizar, representar pictóricamente, determinar, objetivar o realizar una descripción espacial como la de la física clásica.

<sup>32</sup> Es cierto que el determinismo es solo un tipo de conexión causal—denominada causalidad fuerte— que puede ser sustituida por otro tipo de causalidad que, en el ámbito cuántico, será de tipo estadístico o probabilístico, denominada por Bohr como causalidad “débil”; la cual sigue permitiendo la elaboración de leyes y teorías físicas porque, pese a lo anterior, implica una cierta regularidad de los fenómenos cuánticos. En cuanto al “contenido físico”, él mismo propone que se modifique el uso y significado referencialista de los conceptos por un uso y significado simbólico y analógico que se aproxima a aquello que la realidad es pero no llega a describirla tal cual es, lo cual nos sugiere que la realidad —a la que nos acostumbró la física clásica y nuestra forma de percepción— es de naturaleza diferente y que no tiene por qué ajustarse a la forma humana de percibir la exterioridad del mundo físico. Esto le permite defender un realismo moderado, que no se define por el ideal de objetividad clásica ni por el representacionismo pictórico (espacial), pero mantiene un tipo de conexión entre teoría y realidad que, si bien es simbólica y abstracta, puede funcionar comprometiendo ontológicamente la teoría con la realidad física. Tal compromiso ontológico permite sustituir el ideal de objetividad clásica —vinculado a la noción de realidad física independiente— por otro tipo de objetividad que, más bien, se define como intersubjetividad.

En otro artículo, que podría considerarse un complemento de este, definiendo el realismo de la física cuántica, en tanto que es capaz de ofrecer un tipo de *representación* que no es visual, espacial ni pictórica, sino *simbólica*, abstracta o quizá formalista, donde el *tiempo* sustituye al espacio en su rol fundamental para conectar las tan abstractas matemáticas de su formalismo teórico con la realidad. Ahora bien, se trata de un tiempo que ya no está espacializado, no es homogéneo ni una coordenada más como cualquier otra de las coordenadas del movimiento; en este nuevo contexto es un tiempo que no ha perdido su apropiada naturaleza dinámica de devenir, vibración u oscilación y consigue mantener esto en función de la magnitud fundamental de la *frecuencia*, que en física cuántica está ligada y es directamente proporcional a la energía. Así, la naturaleza del movimiento—incluso también de la propia materia— posee un principio activo, energético, que está conectado a la frecuencia, la cual es la magnitud inversa al periodo ( $\text{frecuencia} = 1/\text{periodo}$ ) y el periodo es una magnitud temporal. Simultáneamente, el nuevo concepto de *tiempo*—no clásico— está capacitado para ofrecernos una nueva cosmovisión del mundo, que denomino *dinamismo cuántico*, cuya estructura temporal, en tanto oscilaciones, vibraciones, ritmos, pulsaciones, fluctuaciones o variaciones resonantes se producen de manera regular y, por lo tanto, puede ser medida y calculada. Lo cual nos indica que dicha estructura temporal de la realidad física es también de naturaleza matemática y que es compartida por el tipo de matematización teórica de la física cuántica, con base en la intuición temporal como esquema numeral.

## Bibliografía

01. Andrade e Silva, João y Georges Lochak (1969), *Los cuantos*, Madrid, Editorial Guadarrama, 242 pp.
02. Bernal, John. D. (2007), *La Ciencia en la Historia*, tomo II, Durango, Editorial de la Universidad Juárez del Estado de Durango, 310 pp.
03. Bohr, Niels (1988), *La teoría atómica y la descripción de la naturaleza*, M. Ferrero Melgar (trad.), Madrid, Alianza, 156 pp.
04. Cadenas Gómez, Yolanda (2006) *Epistemología, ontología y complementariedad en Niels Bohr*, Madrid, Editorial Complutense, 692 pp.
05. De Broglie, Louis (1951), *Física y Microfísica*, Cortés Pla (trad), Madrid, Espasa Calpe, 330 pp.
06. Einstein, Albert (1981), *Mis ideas y opiniones*, José M. Álvarez Flórez y Ana Goldar (trad.), Barcelona, Antoni Bosch, 342 pp.
07. Einstein, Albert y Leopold Infeld (1993), *La evolución de la física*. Barcelona, Salvat, 242 pp.
08. González Recio, José Luis (2002), "Introducción", en *Filosofía de la naturaleza*, Madrid, Ediciones Encuentro, 88 pp.
09. Hilbert, David (1991), *Fundamentos de la Geometría*, Francisco Cebrián (trad.), Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 322 pp.
10. Jammer, Max (1966), *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. New York, McGraw-Hill, 340 pp.
11. Newton, Isaac (2011), *Principios matemáticos de la filosofía natural*, Eloy Rada (trad.), Madrid, Alianza Editorial, 786 pp.

12. Papp, Desiderio (1968), *La doble faz del mundo físico*, Madrid, Espasa Calpe, 188 pp.
13. Paty, Michael (1993), *Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique*, Paris, Presses Universitaires de France (PUF), 584 pp.
14. Penrose, Roger (2008), *El camino a la realidad*, Javier García Sanz (trad.), Debate, 1470 pp.
15. Reichenbach, Hans (1953), *La filosofía científica*, Horacio Flores Sánchez (trad.), México, Fondo de Cultura Económica 336 pp.
16. Sánchez del Río, Carlos (1986), *Los principios de la física en su evolución histórica*, Madrid, Editorial de la Universidad Complutense.
17. Schlick, Moritz (2002), *Filosofía de la naturaleza*, Madrid, Ediciones Encuentro, 88 pp.
18. Torres del Castillo, Gerardo Francisco et al. (2010), "The action of canonical transformations on functions defined on the configuration space", en *Revista Mexicana de Física*, vol. 56, núm. 2, México, abril, Sociedad Mexicana de Física, pp. 113-117.

YOLANDA CADENAS GÓMEZ. Doctora en Filosofía con sobresaliente *cum laude* por la Universidad Complutense de Madrid (UCM), España. Es miembro de la Sociedad Mexicana de Física y del Sistema Nacional de Investigadores (México), periodo 2009-2011 y 2016-2018, nivel I. Recibió el reconocimiento de Perfil Deseable del Programa de Mejoramiento del Profesorado (Promep), México, periodo 2009-2011 y 2014-2016. Es colaboradora honorífica del Departamento de Filosofía I, Facultad de Filosofía, de la Universidad Complutense de Madrid (UCM), España. Ha publicado artículos y textos académicos a nivel nacional e internacional. Actualmente es investigadora y profesora de Tiempo Completo de la Universidad Autónoma de Nayarit.