



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Facultad de Estudios Superiores Acatlán

**Unidades naturales de Max Planck como fundamento epistémico
de la continuidad de la Física teórica desde un enfoque
magnitudinal**

Tesis

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
Licenciatura en Filosofía**

PRESENTA:

Katia Pamela Martínez Casañas

Tutora: Dra. María Esperanza Rodríguez Zaragoza



Santa Cruz Acatlán, Naucalpan, Estado de México (FES Acatlán) 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A mi familia, por todo y por tanto. A mis amigos, por ser (Carlos, Cinthya, Alex) y por estar (Vero, Omar, Cirilo, Simón, Neto, Karen y Gris). A Hope, a Guiuse, a mi mamá, a mi hermana, por todo, por tanto, por ser y por estar, pero, sobre todo, por entender. A Galatea, por empezar conmigo un camino que no terminaríamos juntas.

A Ale y a Juan, por caminar conmigo un sendero lleno de ciencia, de filosofía, de lunas y estrellas. A Omar, por unirse a ese sendero y acompañarme más que cualquier otra persona, por salvarme una y mil veces, por no dejarme sola.

A De Icaza, quien me miró a los ojos y me hizo entender que perder el tiempo, es perder la existencia. A Alcalá, por regresarme al camino que abandoné por miedo, al camino de la filosofía y la filosofía de la ciencia, porque, sin proponérselo, por medio de charlas breves, me sembró dudas y me dio respuestas.

Finalmente, agradezco al PAPIME PE-402619 por el apoyo brindado en la realización de esta investigación.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo I: Connotación epistemológica de la discontinuidad energética.....	9
1. Introducción.....	9
2. Surgimiento y asimilación de una física discontinua.....	11
2.1. El estatus del problema de la radiación.....	14
2.2. Elementos conceptuales que conforman la ley de Planck: origen de la discontinuidad energética.....	24
2.3. Relación entre los cuantos de energía de Max Planck y las partículas luminosas de Albert Einstein: ampliación de la discontinuidad energética.....	29
3. Hipótesis cuántica: Su inconformidad con la física clásica (un esbozo de su carácter epistemológico).....	32
3.1. Incompatibilidad con las leyes de Maxwell.....	32
3.2. Hipótesis cuántica y probabilidad.....	34
3.3. Hipótesis cuántica y discretización: Implicaciones en la forma de cuantificar los fenómenos físicos.....	37
4. Conclusiones del primer capítulo.....	38
Capítulo II: Replanteamiento de la ruptura e incompatibilidad de la ley de Planck respecto de los fundamentos de la física teórica en función de su contenido métrico-operacional.....	40
1. Introducción.....	40
2. Replanteamiento de las consecuencias epistemológicas de la discontinuidad: Dogmatismo epistemológico e incompletud en la física teórica.....	41
3. Discontinuidad energética en función de la estructura métrica-operacional de la física teórica.....	48
3.1. El papel central de los términos teóricos métricos dentro de las teorías físicas.....	49
3.2. Contenido métrico operacional y significado físico.....	51
3.3. Definición del análisis magnitudinal para determinar el significado físico de una magnitud derivada (el cuanto de acción).....	55
4. Conclusiones del capítulo.....	59

Capítulo III: Continuidad métrica de la física teórica	61
1. Introducción	61
2. Análisis magnitudinal y derivación métrica de la magnitud de acción h	62
2.1. Derivación métrica de la magnitud de acción	66
2.2. Implicaciones epistemológicas de la derivación métrica de h	70
3. Fundamentalidad epistémica de las Unidades Naturales de Max Planck	74
3.1. Definición y significado del conjunto de Unidades Naturales de Max Planck	75
3.2. Connotación epistémica de las Unidades Naturales de Max Planck: su alcance y límite en relación con el conocimiento generado por la física teórica.....	82
4. Conclusiones del capítulo	87
Conclusiones generales	89
Referencias bibliográficas	92
Bibliografía.....	93

Introducción

La maduración de las teorías físicas ha traído consigo la necesidad de dividir a la ciencia física en ramas o secciones que atienden al estudio particular que hacen del comportamiento y estructura de la materia, tales como mecánica, electricidad, magnetismo, termodinámica, óptica, así como ramas que centran sus esfuerzos en el comportamiento y estructura de las partes últimas de la materia (microfísica), como mecánica cuántica, física nuclear, relatividad, etc., (Gálvez F., López R., 1998). Las primeras constituyen la física clásica y, las segundas, la física moderna, ambas son disciplinas distintas de la misma ciencia, en tanto que admiten una interpretación matemática de la naturaleza, esto es, porque cada una de ellas se reduce a la física matematizada inaugurada por Galileo y desarrollada en los años posteriores. Sin embargo, esta relación entre el fenómeno empírico y su matematización, que comparten las teorías físicas, resulta imprecisa o, incompleta, en tanto que omite un aspecto esencial relativo a las discrepancias intrínsecas de la cuantificación y conceptualización de los fenómenos físicos, aquellas que surgieron con la relativización en el rigor de las mediciones dentro de las teorías de la física moderna, específicamente en la física cuántica que comenzó con la teoría de los cuantos de Max Planck.

La ley de Planck buscaba explicar la emisión de la radiación de los cuerpos calientes, lo que lo llevó a postular la hipótesis cuántica, que consiste en suponer que la energía está restringida en múltiplos de una cantidad denominada cuanto de acción, simbólicamente: h . El hecho de que la energía fuera emitida mediante cuantos de acción, también llamados paquetes de energía, quiere decir que su cuantificación se da por medio de cantidades discretas, cuyos valores sólo pueden ser múltiplos de h : $h\nu$, $2h\nu$, $3h\nu$... $nh\nu$, en donde ν es la frecuencia. Esto se contraponía a la forma clásica, no sólo de concebir la energía, sino de cuantificarla como una cantidad continua. Una cantidad continua es aquella que puede adquirir cualquier valor dentro de un rango finito. Pensemos, por ejemplo, en un rango entre 1 y 10, y supongamos que un paquete de energía tiene un valor de 2. Lo que indica la hipótesis cuántica es que la energía no se emite en valores de 3, 5, 7 y 9, sino en múltiplos de 2: 4, 6, 8 y 10, a diferencia de la forma en la que se cuantificaba la energía en las teorías clásicas, en las cuales la cantidad de energía podía ser medida del 1 al 10 pasando por todos los valores intermedios entre ambos números. De tal suerte que, por medio de la hipótesis cuántica, la

cuantificación de la energía pasó de ser una propiedad continua a una discontinua. Esta peculiaridad en la cuantificación indicó un nuevo aspecto a considerar dentro de la conceptualización, ya que puso de manifiesto propiedades físicas intrínsecamente indeterminadas, debido a que sólo podían ser cuantificadas discontinuamente, lo que supuso una crisis en el modelo mecanicista, inherente a las teorías clásicas de la física, en tanto que se hizo patente que el modelo resultaba inadecuado para dar cuenta de los fenómenos del mundo microscópico que, según la teoría cuántica, venía acompañado de un carácter estadístico que se veía reflejado en las leyes científicas.

Estos dos elementos, la discontinuidad energética y la adopción de nuevos modelos de explicación científica de carácter probabilístico, lejos de significar un avance en el conocimiento, pusieron de manifiesto lo que parecían ser nuevas bases sobre las cuales practicar la ciencia, bases en torno a la cuantificación y conceptualización de propiedades físicas, pero, también, en torno a lo que teóricamente implicaba su adopción, como la reconstrucción de las teorías clásicas precedentes y la revaluación de los datos empíricos en los que se fundan las leyes físicas.

Esta situación, relativa a la cuantificación en la física supone una situación aporética para la filosofía, en tanto que marca una línea entre el conocimiento generado por las teorías de la física clásica y el conocimiento generado por las teorías de la física moderna. Puntualmente, la dicotomía surge con dos formas distintas de cuantificar un mismo fenómeno (la emisión de energía), y nos lleva a cuestionarnos sobre los fundamentos teóricos y epistémicos de la ciencia física, es decir, nos lleva a cuestionarnos sobre el o los elementos que le dan continuidad al conocimiento generado por la física teórica.

Ahora bien, la historia de la ciencia nos muestra que las leyes científicas siempre pueden ser superadas, pero esto no significa, necesariamente, que su derivación descansa, propiamente, en estimaciones completamente distintas. En ese sentido, la hipótesis de la que parte esta investigación es que, en principio, no podemos descartar que la física cuente con una serie de elementos invariables que le proporcionen continuidad al conocimiento que genera y que, de alguna forma, vincule una teoría con otra. Este supuesto nos lleva a plantearnos, en primer lugar, un cuestionamiento acerca de los elementos fundamentales e invariables que, en caso

de existir, retengan su significado en el contenido, en los métodos y/o en las normas de resolución que permiten llevar a puerto un estudio físico de la realidad empírica.

Como veremos en el desarrollo de la investigación, estos elementos los podemos rastrear en la estructura métrica de la física teórica, compuesta por una base magnitudinal canónica e invariable, de la que se derivan las magnitudes representativas de la física teórica y que disuelve, en principio, la discontinuidad relativa al conocimiento entre la física clásica y la física moderna, marcada por la cuantificación y conceptualización de propiedades físicas, pues se vincula estrechamente con un sistema de unidades de medida al que responde la medición de propiedades físicas mensurables.

Así pues, en esta investigación se trabajará la dicotomía de la física teórica a la luz de los problemas que sugiere la cuantificación y la conceptualización dentro de las teorías físicas desde un enfoque magnitudinal, es decir, a partir del análisis de la estructura métrica de la física.

La forma de proceder será dirigiéndonos al origen del problema desde un enfoque que apele al conflicto intrínseco que caracterizó el desarrollo de la física moderna, es decir, dirigiéndonos a la génesis, desarrollo y posterior justificación de la teoría cuántica introducida por Max Planck. La razón por la cual se hará uso de la ley de Planck es, porque, por medio de ella se introduce la teoría cuántica, a través de una forma distinta de cuantificar el fenómeno de la luz, que devino en una serie de reformulaciones teóricas dentro de la ciencia física. Estas reformulaciones de las que hablamos sólo pueden ser planteadas y entendidas en la medida que esclarezcamos el proceso teórico por medio del cual se introdujo y justificó la ley de Planck.

La investigación estará situada dentro de los límites de la filosofía de la ciencia, entendiéndola como aquella que estudia la producción científica, pero, también, dentro de los límites de la epistemología, con la intención de justificar el aumento y la continuidad teórica del conocimiento científico, particularmente, el conocimiento generado por las teorías de la ciencia física. Siguiendo la filosofía de Ulises Moulines, quien predica que la filosofía de la ciencia solo puede construirse con base en ejemplos concretos, relativos a los problemas de las teorías científicas, esta investigación se decanta por un análisis que parte de las teorías

físicas tal cual fueron formuladas, con la intención de comprenderlas a partir de los recursos que intervinieron en su formulación y justificación, esto es, haciendo uso de los recursos matemáticos, como ecuaciones y demostraciones, y el desarrollo paso a paso de la ley de Planck, en la que resalta el uso de hipótesis y métodos científicos. Describir la evolución de los primeros años de la teoría cuántica tiene como intención tener un panorama general y profundo de los problemas de la física que, como estudiantes de filosofía, y no de ciencias empíricas, como la física, nos resultan a veces limitados e inaccesibles. Esto quiere decir que, antes de hacer juicios, sentencias o reflexiones de carácter filosófico, la investigación se centrará ampliamente en la descripción detallada de la ley de Planck, así como en su derivación matemática y su relación con otras leyes y teorías de la física clásica.

Cabe aquí aclarar que esta investigación es solo una contribución positiva al campo de la filosofía de la ciencia, particularmente, a la filosofía de la física, en tanto que no es una crítica de alguna corriente, autor o postura filosófica. Es una investigación que tiene como intención analizar un problema concreto relativo al conocimiento en física teórica y que, a partir de su planteamiento, busca entender los elementos que obran a favor y en contra de una continuidad métrica que haga posible pensar en un vínculo entre una teoría y otra. Hacer uso de los recursos de conceptualización y cuantificación, en relación con el aparato métrico de la física teórica, será el criterio para hablar sobre el vínculo teórico sobre el que descansan los elementos epistémicos que sobresalen en la elaboración de las teorías físicas.

Aclarado lo anterior, podemos decir que el objetivo de esta investigación es analizar la introducción de la discontinuidad cuántica dentro de la física teórica, para rastrear los elementos que obran a favor de la continuidad del conocimiento generado por las teorías de la física, a la luz de un análisis magnitudinal que consiste en hacer uso de magnitudes base o fundamentales, así como de un sistema de unidades de medida, en concreto, el Sistema de Unidades Naturales de Max Planck.

Abogar por la continuidad de la física teórica desde un enfoque magnitudinal, es decir, a partir del análisis de la estructura métrica de la física que contemple, no sólo la cuantificación, sino, también, la conceptualización del fenómeno físico ofrecerá al campo de la filosofía, particularmente, al campo de la epistemología, un fundamento epistémico que dé cuenta del conocimiento que se obtiene de las teorías físicas matematizadas de la realidad empírica.

Epistémico en el sentido de que son las magnitudes base y las Unidades Naturales de Planck las que rigen la manera de cuantificar y conceptualizar las propiedades físicas, incluso si esta cuantificación y conceptualización se da desde diferentes conjuntos de teorías, de tal suerte que pueden ser consideradas como parte de la estructura estática de la física teórica. Esta continuidad epistémica de la que hablamos sugiere que tanto la física clásica como la física cuántica comparten una base operativa, dada por magnitudes base y un sistema de unidades naturales, que regula la forma en la que se cuantifican y conceptualizan las propiedades físicas. Estos dos elementos comunes implican una relación entre el conocimiento que generan las teorías clásicas y el que generan las teorías cuánticas, incluso cuando ambas trabajan su objeto de estudio desde dos parámetros distintos, la primera, a partir de mediciones de naturaleza continua y, la segunda, a partir de mediciones de naturaleza discreta.

A continuación, se describirán los elementos que componen la investigación en general con el fin de proporcionar al lector una guía que lo oriente en su estudio. La estructura del escrito es la siguiente:

- Capítulo I: Connotación epistemológica de la discontinuidad energética

El propósito del capítulo primero es sentar las bases del conflicto epistemológico que surge con la ley de Planck, y que deviene en la ruptura e incompatibilidad de la física moderna respecto de la física clásica, lo cual se llevará a cabo a partir de los matices de la introducción de la hipótesis cuántica que se ven reflejados a través de los recursos teóricos que usó Max Planck en función de tres momentos: su origen, su desarrollo y su posterior justificación, para lo cual será necesario hacer uso de los recursos matemáticos implementados en la derivación de la ley de Planck, resaltando la relación que tuvo con otras leyes y teorías. Estos elementos en conjunto permitirán ver los conflictos relativos al conocimiento en, al menos, tres aspectos: el primero tiene que ver con la inconformidad de la hipótesis cuántica respecto de las leyes clásicas del electromagnetismo; el segundo, apela al enfoque probabilístico característico de la ley de Planck; y, el tercero, se vincula con las consecuencias que de suyo introdujo la cuantificación de la energía dentro del marco de la física teórica.

El marco teórico en el que se moverá esta sección atiende, principalmente, a obras y artículos de corte científico, ya sea especializado o de carácter divulgativo, como lo son los artículos de Max Planck (1901) Albert Einstein (1905), y Ludwig Boltzmann (1897), por un lado y, por el otro, a las obras editadas por la revista de *National Geographic: Max Planck* (Pérez, 2012), *Einstein* (Blanco, 2012), *Boltzmann* (Arroyo, 2012) y *Maxwell* (Sabadell, 2013). El uso de estas obras permitirá abordar el problema desde la enunciación misma de cada ley, haciendo uso de los recursos teóricos y matemáticos que originaron un dilema dentro de la física teórica. Del mismo modo, se hará uso, aunque en menor medida, de dos obras de carácter filosófico e histórico, éstas son: *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica 1894-1912*, de Thomas Kuhn (1980), e *Historia de la Física cuántica*, de José Manuel Sánchez Ron (2005).

- Capítulo II: Replanteamiento de la ruptura e incompatibilidad de la ley de Planck respecto de los fundamentos de la física teórica en función de su contenido métrico-operacional

El propósito del segundo capítulo es distinguir la naturaleza de los conflictos a los que se llegó en el capítulo pasado y que surgieron con la ley de Planck, para separar aquellos cuya naturaleza sea realmente de carácter epistemológico –esto es, que se vinculen realmente con el conocimiento generado por las teorías de la física teórica– de los conflictos que no son. En la primera parte, se analizarán los conflictos que no son sustanciales en relación con los fundamentos teóricos de la física y que, según se verá, se centran en el uso probabilístico de la ley de Planck y en el abandono del determinismo clásico que surge con éste. En la segunda parte se replanteará la noción de discontinuidad energética, explicada en el primer capítulo, en relación con la estructura métrica-operacional de la física teórica. La intención es resaltar el hecho de que, a través de la noción del significado físico de la magnitud de acción, que es representativa de la ley de Planck y núcleo teórico de la física cuántica, es posible dar argumentos a favor de la continuidad teórica de la física, al menos en sentido métrico. La sección se centrará en mostrar que la derivación en sentido métrico de la magnitud de acción puede ser una garantía de la continuidad métrica de la física teórica.

Es importante acotar que este capítulo es de transición, ya que recoge los problemas planteados en la primera parte de la investigación, situados desde una perspectiva más científica que filosófica, e introduce los puntos a tratar en el capítulo tres que apelan más a una posición filosófica que a una científica, pues parten de un análisis extrateórico, es decir, independiente de las leyes en sí mismas. En el desarrollo del capítulo se harán uso de los artículos del filósofo Juan Arana, particularmente *El problema de la causalidad en la mecánica cuántica* (2012), ya que es ahí en donde el autor hace un análisis de las situaciones que desató el uso de la hipótesis cuántica en relación con el determinismo y la probabilidad, por lo que será el eje para disociar los problemas epistemológicos de aquellos que no lo son. Así mismo, se hará uso de la tesis doctoral de Carmen Sánchez, *Análisis magnitudinal y la estructura métrica de la mecánica cuántica* (2007), porque en su investigación se encuentran los elementos que describen la relación existente entre las teorías clásicas y las teorías modernas de la física teórica, a partir de la descripción de los recursos métricos que utiliza la física teórica para cuantificar y conceptualizar los fenómenos físicos, lo que permitirá situar los conflictos epistemológicos de la discontinuidad cuántica desde una postura que le dé respuesta a las disyuntivas planteadas.

- Capítulo III: Continuidad métrica de la física teórica

El propósito del último capítulo se divide en dos partes. En primer lugar, el capítulo tiene como intención hacer uso del análisis magnitudinal, propuesto por Carmen Sánchez, para demostrar el carácter de magnitud derivada de la magnitud de acción en función de una base magnitudinal fija e invariable, para evidenciar que la brecha que surge a raíz de la inderivabilidad de la magnitud de acción, respecto de las teorías de la física clásica, se disuelve cuando se demuestra que, de hecho, es una magnitud derivable. En segundo lugar, el propósito de este capítulo es vincular la base magnitudinal fija e invariable –que surge como consecuencia de la estructura métrica de la física y del análisis magnitudinal– con el Sistema de Unidades Naturales de Max Planck, con la intención de dar un fundamento epistémico de la continuidad de la física teórica.

El capítulo mostrará, por un lado, que la relevancia que tiene la derivación de la magnitud de acción descansa en que, a partir de ella, se torna evidente la relación que guarda la estructura métrica de la mecánica cuántica con la estructura métrica de la mecánica y el electromagnetismo clásicos. Por otro lado, se podrá ver que el conocimiento generado por las teorías de la física teórica tiene como fundamento una base magnitudinal y un sistema de unidades naturales, cuyo valor descansa en constantes físicas universales, debido a que de ellas se deriva el Sistema de Unidades de Planck. Los límites y alcances de este fundamento epistémico, basado en el significado de las Unidades de Planck, se plantearán en relación con las nociones de sujeto epistémico y comunidad epistémica de Luis Villoro.

Los recursos teóricos de los que se hará uso en este capítulo son principalmente dos: el primero, es la obra ya citada de Carmen Sánchez, porque en ella se encuentra la derivación de la magnitud de acción de la que se hará uso; el segundo recurso será la obra de Luis Villoro, *Creer, saber, conocer* (1989), concretamente nos restringiremos al uso de las nociones de sujeto epistémico y comunidad epistémica.

Capítulo I: Connotación epistemológica de la discontinuidad energética

1. Introducción

¿Qué diferencia hay entre la física Clásica y la física Moderna? Roger Penrose en *La mente nueva del emperador* (2002) sostiene que la física clásica comprende las teorías de la mecánica de Newton hasta la relatividad de Einstein. Esta clasificación descansa en lo que el autor define como una especie de desviación de la teoría cuántica, respecto del esquema básico de la estructura de las teorías newtonianas. Esta desviación de la que nos habla Penrose surge, concretamente, con la hipótesis especial o hipótesis cuántica que introdujo el físico alemán Max Planck en 1900 (1900) relativa a la cuantización de la energía, y es reforzada con los trabajos de Albert Einstein, publicados en 1905 (1905) relativos al comportamiento de la luz. Ambos autores introducen lo que se conoce como *discontinuidad cuántica*. La discontinuidad cuántica se define como el hecho de que la energía no pueda ser cuantificada por medio de valores continuos, sino discretos, es decir, que no pueda adquirir cualquier valor dentro de un rango finito y que esté limitada a múltiplos de cierta cantidad¹.

De esta forma discontinua de cuantificar la energía surgen incompatibilidades o rupturas, desviaciones como lo señala Penrose, respecto de la física clásica. Es decir, la cuantificación discreta de la energía llegó enmarcada por elementos que sugerían que no había una relación de compatibilidad entre la hipótesis cuántica y las leyes de la física clásica, por lo que se llegó a pensar en una ruptura o desviación de la teoría cuántica, en tanto que cuantificaba una propiedad física, la energía, de forma diferente a como se cuantificaba dentro de las leyes clásicas. Los signos que enmarcan la ruptura y la incompatibilidad, impuestos por la discontinuidad cuántica, tienen su origen en la ley de radiación de un cuerpo negro o, simplemente, ley de Planck.

¹ La noción de discontinuidad cuántica será trabajada a lo largo de todo el capítulo, por lo que su comprensión será paulatina, debido a que son varios los elementos teóricos que se necesitan para entender su significado. Sin embargo, es importante tener en cuenta que una cantidad continua, como se resaltaba en la introducción, es aquella que, dentro de un rango finito, puede adquirir cualquier valor; por el contrario, una cantidad discreta es aquella que sólo puede adquirir ciertos valores dentro de un rango finito.

Estos signos son enunciados en las últimas páginas de la primera parte de la obra de Thomas Kuhn, *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica 1894-1912* (1980), en donde deja ver que la discontinuidad es un signo de *ruptura* entre las teorías de la física clásica y la teoría cuántica remarcando, al mismo tiempo, su *incompatibilidad* con la estadística clásica. Ambas, la ruptura y la incompatibilidad, refieren, en principio, a las opiniones que la teoría del cuerpo negro de Max Planck despertó en sus contemporáneos y que se ven resaltadas de la siguiente forma:

“[...] Aunque hacia la época en que fueron escritas estas recensiones habían empezado a cambiar ya las actitudes hacia el significado de la obra de Planck, eran sólo dos o tres personas las que habían entrevisto alguna razón para suponer que allí se escondía una ruptura con la física clásica” (Kuhn, 1980, pág. 168) y “[...] Rayleigh observó que la obra de Planck parecía ser empíricamente correcta y al mismo tiempo incompatible con la base estadística clásica del enfoque de Jeans” (Kuhn, 1980, pág. 166).²

La terminología usada por Kuhn sugiere que la discontinuidad energética, es decir, el cambio en la forma en la que se cuantificaba la energía, significó una ruptura y una incompatibilidad respecto de la física clásica. Por definición, una ruptura sucede cuando un elemento se separa de un todo al que inicialmente pertenecía o del que formaba parte; mientras que la incompatibilidad se enuncia como la incapacidad de existir de algo o alguien conjuntamente a otro algo u otro alguien. Partiendo de estas definiciones, y desde un primer acercamiento, la ruptura que se escondía en la obra de Planck alude a la separación de la ley de Planck respecto del conjunto de leyes clásicas. Por su parte, la incompatibilidad de la que habla Kuhn invita a pensar que los recursos matemáticos a los que apela la obra de Planck, particularmente, la ley que lleva su nombre, no eran compatibles con la base estadística clásica, esto es, que dentro del complejo teórico no podían darse conjuntamente.

Claramente, este primer acercamiento a los términos de ruptura e incompatibilidad no es suficiente para entender por qué supone un problema para el conocimiento científico. Es necesario, pues, entender si la ruptura y la incompatibilidad se da en relación con los fundamentos de la física y, en sentido, con la forma en la que se lleva a cabo la acción de

² Entre estas dos o tres personas que menciona Kuhn se encontraba Albert Einstein; mientras que Rayleigh y Jeans fueron dos afamados físicos contemporáneos de Max Planck.

conocer o formular conocimiento. De ahí que el propósito de este capítulo sea el de sentar las bases de un conflicto epistemológico impuesto por la discontinuidad energética a la luz de la ruptura e incompatibilidad de la ley de Planck.

Así pues, la investigación nos dicta que, para postular que la cuantificación de la energía, mediante cantidades discretas, tiene consecuencias epistemológicas, es menester mostrar las razones por las cuales ésta (la discontinuidad energética) nos conduce a un problema dentro del conocimiento. Dicho de otra manera, lo que se debe hacer es mostrar en qué condiciones la discontinuidad energética –que, como veremos en el desarrollo de la investigación, nace a la luz de la hipótesis cuántica– nos conduce a postular un conflicto epistemológico en el campo de la física teórica, más allá de uno meramente científico. De ahí que este capítulo tenga como propósito explicar el significado de la discontinuidad desde dos dominios: 1) el origen de la introducción de la hipótesis especial de Planck, haciendo énfasis en las disciplinas y métodos que contribuyeron a su gestación y, 2) las consecuencias de su uso en relación con los fundamentos de la física clásica. A continuación, pasaremos a desarrollar el primer punto.

2. Surgimiento y asimilación de una física discontinua

La discontinuidad energética fue introducida por primera vez a la luz de la ley de distribución para la radiación de cuerpo negro, mejor conocida como ley de Planck. Fue presentada por el físico y catedrático alemán Max Karl Ernst Ludwig Planck el 14 de diciembre de 1900 ante la sociedad física alemana. Su deducción teórica exigió la introducción de la hoy conocida hipótesis cuántica, según la cual, la energía mecánica de un oscilador³ está restringida por múltiplos de una cierta cantidad de energía, que viene determinada por la relación de la energía del oscilador E , la constante de Planck h y la frecuencia de vibración ν , simbólicamente:

³ Los osciladores forman parte del modelo teórico que ideó Planck con el fin de resolver el problema de cuerpo negro; en él, una cavidad, cuyas paredes estaban llenas de osciladores eléctricos que representaban todas las frecuencias, fungía como un cuerpo negro perfecto. En el modelo, los osciladores estaban pensados para emitir y absorber ondas electromagnéticas siguiendo las leyes de Maxwell. Más adelante profundizaremos en este tema.

$$E = h\nu$$

En la ecuación, la energía involucrada en la radiación de un cuerpo negro no podía ser dividida de forma infinita, es decir, de forma continua, porque, desde el comienzo estaba obligada –la energía– a permanecer agrupada en pequeños bloques, esto es, en paquetes discretos de energía de valor $h\nu$. En ese sentido, la discontinuidad que surge con la ley de Planck es relativa a la cuantificación de la energía, que pasó de ser una magnitud continua a una discreta⁴, por lo que se conoce como discontinuidad energética.

La discontinuidad energética, aunque tiene su origen en el descubrimiento de que la emisión de energía se da mediante *cantidades discretas* regidas por el cuanto de acción, que es la magnitud elemental que determina la relación entre energía y frecuencia, posteriormente, se desplazó a los átomos y moléculas con masa, dando pie al complejo teórico de la mecánica cuántica y convirtiéndose en su núcleo teórico.

En retrospectiva, este hecho (la restricción que la hipótesis de Planck impuso a la emisión de energía) colocó a la física teórica en un dilema que desembocó en el replanteamiento de los fundamentos de la física misma. La explicación que mejor describe la situación en la que colocó la discretización de la energía a la física teórica es la enunciada por Walther Nernst en 1910, con motivo del primer congreso Solvay⁵. Nernst escribió:

“Parece que nos encontramos actualmente en medio de una nueva revolución en los principios en los que se basa la teoría cinética de la materia [...] esta teoría... conduce a una fórmula para la radiación que está en conflicto con todos los resultados experimentales, una situación que nadie niega [...]. Como se ha demostrado, especialmente por Planck y Einstein, estas contradicciones son eliminadas si se imponen ciertos límites (el postulado de los cuantos de energía) al movimiento de electrones y átomos [...]. Sin embargo, esta interpretación representa una ruptura tal con respecto a las ecuaciones de movimiento de partículas materiales a las que estamos acostumbrados, que aceptarla significará necesaria e

⁴ Recordemos que una magnitud es continua si puede tener infinitos valores dentro de cualquier intervalo finito; es discreta si no tiene infinitos valores dentro de cualquier intervalo finito.

⁵ Los Congresos Solvay son conferencias científicas que se celebran desde 1911.

incuestionablemente una reforma radical de las actuales teorías fundamentales” (Sánchez, 2005, p. 197).

Aunque no es difícil pensar que la recepción de los trabajos de Planck constituyó una labor compleja, la cita anterior fechada en el año de 1913 (trece años después de la introducción de la hipótesis cuántica) evidencia que la asimilación de la discontinuidad energética constituía un conflicto para la física, cuya solución no empezaría a tener forma hasta varios años después de su introducción a principios del siglo pasado. Al mismo tiempo, las palabras de Nernst dejan ver que el uso de la hipótesis cuántica constituía un elemento ajeno a los principios de las teorías clásicas, pero que sin su uso era imposible hacer coincidir la teoría con los datos experimentales. La introducción de esta hipótesis, como ya apuntábamos, es justamente en dónde radica la ruptura con la física clásica. Finalmente, la misma cita nos indica que son los trabajos de Planck y Einstein aquellos en los que debemos indagar para comprender el postulado de los cuantos de energía o, lo que es lo mismo, para comprender la naturaleza de las restricciones que la hipótesis cuántica impuso a la cuantificación de la energía. Esto quiere decir que, para entender por qué la cuantización de energía entró en completa contradicción con el dominio de los fundamentos básicos de la física, antes bien hay que entender el caso único de la radiación térmica, esto es, comprender las condiciones teóricas bajo las cuales se introdujo el cuanto de acción y, con él, la discontinuidad de la energía. Las condiciones teóricas de la ley de distribución para la radiación de cuerpo negro nos mostrarán la relación de contraste que guarda la discontinuidad respecto de otras leyes fundamentales de la física teórica, lo que evidenciará, a su vez, la ruptura de la que habla Nernst respecto de los fundamentos de la física clásica, haciendo posible un planteamiento adecuado de las consecuencias epistemológicas que trajo consigo la restricción de energía en paquetes, es decir, en cuantos de acción.

En concreto, hay que esclarecer: (1) El estatus del problema de la radiación y su alcance, pues aquí las limitaciones de la física clásica comenzaban a ver la luz; (2) los elementos conceptuales que conforman la ley de Planck, pues es en ella en la que se introduce por primera vez la hipótesis cuántica; y, (3), la relación entre los cuantos de energía de Max Planck y las partículas luminosas de Albert Einstein, en donde podremos ver el carácter

general que adquirió la restricción de energía impuesta por la hipótesis cuántica. En las siguientes páginas se tratarán los tres puntos anteriores.

2.1. El estatus del problema de la radiación

A finales de 1894 Max Planck inició una investigación que, entre otras cosas⁶, lo llevó a buscar la igualdad existente entre la energía emitida y absorbida en un intervalo de tiempo de una cavidad cualquiera. La investigación de la que hablamos se desarrolló a la base del uso de leyes fundamentales de la termodinámica y la electromagnética. El problema que buscaba resolver era conocido como el problema de cuerpo negro. En los años subsiguientes y antes de 1900, esto es, antes de la ley de Planck, el estatus del problema de la radiación de cuerpo negro se encontraba situado de acuerdo con una serie de elementos que se relacionan con la ley de Kirchhoff, que dice que un cuerpo es mejor emisor de radiación en tanto mejor la absorba, las leyes de Maxwell, que describen fenómenos electromagnéticos, los experimentos desarrollados hasta entonces, que son aquellos que ponían a prueba las leyes clásicas que trataban de explicar el problema del cuerpo negro, y los métodos estadísticos de Boltzmann, relativos a la relación entre entropía y probabilidad⁷. Estos elementos son trabajados en la primera parte de la obra de Kuhn, *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica 1894-1912* (Kuhn, 1980) y, también, en la primera parte de la obra de José Manuel Sánchez Ron, *Historia de la física cuántica* (Sánchez, 2005). Ambas obras, al ser de carácter semi-especializado ofrecen una visión oscura para un lector que no esté familiarizado con la terminología teórica de la física, así como con una cantidad considerable de modelos matemáticos, motivo por el cual hacer uso de una obra de carácter divulgativo parece una buena herramienta para asimilar y comprender dichos elementos. Esta accesibilidad en términos de claridad y síntesis la encontramos en las obras editadas por la revista *National Geographic*, particularmente, en la obra dedicada al trabajo de Max Planck,

⁶ La investigación de Planck buscó, en un primer momento, demostrar el carácter fundamental del segundo principio de la termodinámica, que sostiene que la entropía de un sistema aislado nunca puede decrecer, sin embargo, ahondar en estas aguas no es de suyo relevante para la presente investigación, en tanto que ésta no busca dar una visión de la progresiva investigación del trabajo del autor. Para más información sobre ello, véase los tres primeros capítulos de la obra de Thomas Kuhn, *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica 1894-1912* (1980).

⁷ En el desarrollo del capítulo se abordarán por separado cada uno de estos elementos.

en la que podemos leer tres argumentos que nos servirán para entender el estatus del problema de la radiación y la consecuente introducción de la hipótesis cuántica. El primero de ellos versa de la siguiente forma:

“Existía una función universal, cuya existencia había demostrado Kirchhoff, para la forma en que la intensidad de la radiación térmica a una temperatura dada dependía de la frecuencia de la radiación. Esta función era independiente de las propiedades particulares de la materia radiante y, en concreto, se correspondía con la intensidad radiada por un cuerpo negro perfecto”. (Pérez, 2012, pág. 58).

El argumento se centra en la función universal de Kirchhoff, que relaciona la emisión y absorción de energía en objetos calientes, y que fue introducida con el fin de explicar la relación empírica entre la luz que emiten los cuerpos calientes y su temperatura. La comprensión de esta relación y, con ella, la comprensión de la función de Kirchhoff exige ciertas nociones previas, la principal es la de radiación térmica.

La radiación térmica es una de las formas en la que el calor de un cuerpo se propaga, la forma en la que lo hace es por medio de ondas electromagnéticas⁸, esto es así, dado que la luz es un fenómeno ondulatorio, en donde la longitud de onda determina el color de la luz, incluida la que percibimos, llamada luz visible. Las diferentes clases de radiación térmica se fijan por los diferentes tipos de ondas electromagnéticas que constituyen el llamado espectro electromagnético, y cuyos valores son diferentes dependiendo de la frecuencia y la longitud de onda. El espectro electromagnético está formado por la luz visible, los rayos infrarrojos y los rayos ultravioletas, que se corresponden con la radiación visible, la radiación infrarroja y la radiación ultravioleta, respectivamente. Los cambios de color que describe el espectro electromagnético, y que experimentan los cuerpos, se corresponden, a su vez, con el calor que el cuerpo emite, esto es, cuanto más caliente es el cuerpo, más evoluciona el color de la luz que se emite del rojo al azul, lo que quiere decir que los cuerpos que tienden al primero son menos calientes que los que tienden al segundo.

⁸ Maxwell constató en 1862 que la luz también era un campo electromagnético en el artículo *On physical lines of force* (1862), posteriormente, Hertz demostró experimentalmente que los efectos electromagnéticos, como el calor radiante y la luz, se transmiten a través de perturbaciones (ondas).

Ahora bien, regresando al problema que incentivó la investigación de Kirchhoff y considerando la información previa, puede resultar obvia la relación física entre la luz que emiten los cuerpos y su temperatura, pero, para la época en la que el físico desarrollaba su investigación, no era del todo claro si la relación entre color y temperatura atendía únicamente a estos dos elementos o, si detrás de ella, era necesario considerar algún otro.

Para lograr dicho cometido era imperativo un modelo que fuera capaz de absorber toda la radiación (calor) que le llegara y la volviera a emitir. A este modelo se le conoció como el modelo del cuerpo negro. Como ya se vio, todos los cuerpos calientes emiten radiaciones térmicas o, lo que es lo mismo, ondas electromagnéticas de energía, aunque esta radiación sólo es visible cuando el cuerpo incrementa su temperatura en grandes cantidades. Cuando la radiación de un cuerpo caliente llega a otro objeto menos caliente, una parte de la radiación emitida es absorbida y otra reflejada por el segundo cuerpo; un hecho interesante es que los colores oscuros son los que mejor absorben la radiación, de ahí que un cuerpo negro sea un cuerpo capaz de absorber toda la radiación electromagnética que llega a su superficie, en otras palabras, un cuerpo negro absorbe toda la luz que le llega y no emite nada. Un cuerpo negro ideal, aunque no emite, sí radia energía, esto, aunque parece contradictorio, no lo es. En la obra de *National Geographic* antes mencionada encontramos un ejemplo que permitirá comprender esta situación:

“Imaginemos que tenemos un cuerpo incandescente frente a un objeto negro y que los dos están totalmente aislados, de manera que no hay forma de que el calor se escape. El objeto negro irá absorbiendo el calor del otro cuerpo y, por tanto, se irá calentando: su temperatura se incrementará a medida que absorba la energía que desprende el cuerpo incandescente. Llegará un momento en que la temperatura del cuerpo negro se iguale con la del cuerpo incandescente [...]” (Pérez, 2012, pág. 34).

La pregunta que sigue es ¿Podrá seguir absorbiendo calor el cuerpo negro a partir de ese momento? De ser este el caso, se estaría llevando a cabo una violación al segundo principio de la termodinámica, que indica que el calor pasa de los cuerpos calientes a los cuerpos fríos y no de forma inversa, es decir, el calor estaría pasando del cuerpo incandescente al cuerpo más caliente, en este caso el cuerpo negro, por lo que la respuesta en definitiva es no, el

cuerpo negro no podrá seguir absorbiendo el calor. Lo que ocurre, en consecuencia, con la energía que no es absorbida es que, necesariamente, debe ser radiada por el cuerpo negro.

El modelo que consideró Kirchhoff de cuerpo negro fue una esfera hueca con una superficie ennegrecida y con un pequeño agujero por donde entraba la radiación que era reflejada en las paredes de la cavidad hasta ser absorbida totalmente; además, el cuerpo negro emitía radiación para mantener el equilibrio térmico. Lo que hizo fue investigar la radiación de este cuerpo y llegó a la conclusión de que *la relación entre emisión y absorción permanece constante para todos los cuerpos* (Sánchez, 2001, p. 28) y que *la capacidad de emisión del cuerpo negro [...] es independiente de su constitución* (Sánchez, 2001, p. 28). Estos dos elementos fueron los que dieron pie a la función universal de Kirchhoff, que enuncia que: *Cuanto mayor sea la capacidad de emisión de un cuerpo, mayor debe ser su capacidad de absorción* o, lo que es equivalente, *cuanto más caliente esté un cuerpo más energía radiante emite*. De forma abreviada, lo que quiere decir la función es que la intensidad de la radiación térmica (calor), a una temperatura dada, depende de la frecuencia de radiación, es decir, que el rango y la intensidad de ella sólo obedece a la temperatura. En términos simples, lo que describe la ley es su independencia respecto de las propiedades particulares de la materia radiante y su correspondencia con la intensidad radiada de un cuerpo negro perfecto, con lo que quedaba establecida la relación entre el color que emiten los cuerpos calientes y su temperatura.

La función de Kirchhoff dio paso al problema de la radiación de un cuerpo negro, que consistía en determinar la ley que describiera mejor el espectro de radiación del cuerpo negro para cualquier temperatura dada, es decir, el problema radicaba en encontrar una función por medio de la cual obtener la intensidad de radiación emitida de un cuerpo negro en función de su longitud de onda. Como se mencionó al inicio de la sección, este es justo el problema al que le dio respuesta Planck y con el que se introdujo la hipótesis cuántica.

Para avanzar con la investigación, pasaremos al segundo argumento que sintetiza el estatus del problema de la radiación y la consecuente introducción de la hipótesis cuántica, este dice de la siguiente forma:

“Planck había ideado un cuerpo negro modelo: una cavidad cuyas paredes estaban llenas de osciladores eléctricos de todas las frecuencias. Estos osciladores absorbían y emitían ondas electromagnéticas de acuerdo con las leyes de Maxwell.” (Pérez, 2012, pág. 58).

El problema de la radiación de un cuerpo negro no era un problema menor en el contexto de la física teórica del siglo antepasado, a Planck le costó al menos seis años encontrar una función que describiera la forma en que la intensidad de la radiación (calor o energía radiante) de un cuerpo negro cambia dependiendo de la frecuencia. Esto, cómo veremos más adelante, no sólo se debía a las limitaciones de la física clásica, sino, también, a las limitaciones de los modelos experimentales de cuerpo negro. Pero, antes de pasar a ese punto de la historia, Kuhn nos muestra los elementos conceptuales que dieron paso a la progresiva evolución de la investigación de Planck, sin los cuales es difícil entender la cita previa y, sobre todo, la posterior ley de radiación.

En primer lugar, hay que considerar que, como lo muestra el ejemplo del cuerpo incandescente frente a un cuerpo negro, la radiación que emite este último es un caso de equilibrio térmico, ya que, para que el cuerpo negro emita radiación térmica, la cantidad de energía (calor) que absorbe del cuerpo incandescente debe ser igual a la radiación que emite. Razón por la que el modelo de cuerpo negro de Planck, como lo indica la cita, consistiera en una cavidad ennegrecida con paredes llenas de osciladores capaces de emitir y absorber toda la radiación electromagnética, en donde la distribución de la energía tendería al equilibrio a medida que la energía fuera absorbida y radiada por el cuerpo negro. En la siguiente figura, vemos representado el modelo de cuerpo negro de Planck, en donde las paredes de la cavidad están recubiertas por osciladores eléctricamente cargados y la radiación escapa por una pequeña abertura.

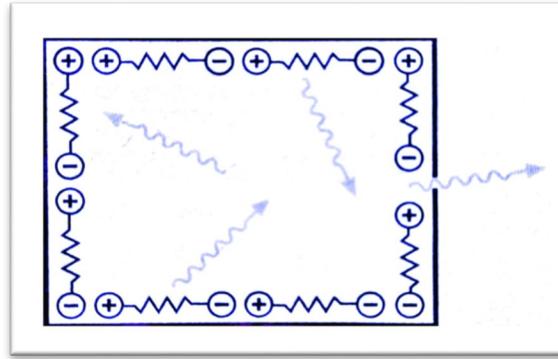


Figura 1

Modelo de cuerpo negro de Planck (Figura obtenida de Pérez, 2012, pág. 53)

Por su parte, los osciladores de Planck eran entidades imaginarias, cuya estructura no era necesario especificar, porque la función de Kirchhoff establecía que el campo electromagnético del cuerpo negro no dependía de la cavidad, es decir, que la distribución de la radiación en equilibrio era independiente del material del cuerpo negro. De ahí que, simplemente, imaginara una cavidad compuesta por una colección de osciladores cargados (con carga positiva y negativa) que representaban todas las frecuencias posibles y su relación con las ondas electromagnéticas, por lo que, *el problema de entender cómo se obtiene el estado de equilibrio pasaba a plantearse en términos de procesos de interacción entre ondas electromagnéticas y osciladores* (Sánchez, 2005, pág. 130).

Haciendo uso de la teoría electromagnética de Maxwell e igualando los ritmos de emisión y absorción de los osciladores cargados en equilibrio con la radiación, Planck consiguió deducir la relación entre la energía del oscilador y la del campo electromagnético, que viene dada por la siguiente ecuación:

$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U_\nu$$

En donde u_ν representa la energía por unidad de volumen de la radiación y por unidad de frecuencia del campo electromagnético, ν la frecuencia y U_ν la energía del oscilador. Como en la relación sólo aparece la frecuencia y la constante de la velocidad de la luz, lo único que faltaba era conocer U_ν para resolver el problema de la ley de radiación. Concretamente, el

escollo estaba en encontrar la energía del oscilador como función de la frecuencia y la *temperatura*. Aunado a esto estaba el hecho de que el segundo principio de la termodinámica permite obtener la relación entre energía y temperatura a partir de la expresión de la *entropía*, por lo que la investigación de Planck se volcó en la interpretación de esta última, específicamente, en la interpretación de la entropía propuesta por Boltzmann: una interpretación de carácter probabilístico. Respecto a esto, Sánchez Ron menciona que en *la manera en que Planck llegó a proponer la ley de radiación de un cuerpo negro, [...] al igual que en el procedimiento que siguió para introducir los cuantos, la entropía desempeña un papel central* (2005, pág. 120). Agrega que, aunque la interpretación por la que se decantaba Planck era, en un principio, distinta a una de carácter probabilístico, finalmente terminó por recurrir a los métodos estadísticos de Boltzmann. Esto nos conduce al último argumento que sintetiza el estatus del problema de la radiación del cuerpo negro y en el cual nos detendremos ampliamente dada la injerencia que tuvo Boltzmann sobre los trabajos de Planck relativos a la cuantización de energía. El argumento es el siguiente:

“Planck se había familiarizado con los métodos estadísticos de Boltzmann a raíz de la crítica que este había realizado de las primeras ideas de Planck sobre la radiación de cuerpo negro.” (Pérez, 2012, pág. 58).

Los métodos estadísticos de Boltzmann a los que refiere la cita fueron desarrollados por el físico a la luz de la teoría cinética de los gases. En la base de esta investigación estaba la termodinámica, la teoría atómica y la noción de azar. La posición atomista de Boltzmann surgía de las ventajas teóricas que conllevaba su adopción, es decir, la concebía como una herramienta que ayudaba a resolver una gran cantidad de fenómenos físicos⁹. La teoría atómica consistía en suponer que la materia estaba formada por partículas de minúsculo tamaño que daban origen a fenómenos de escala macroscópica como la temperatura. Esta teoría le sirvió para fundamentar la relación entre entropía y probabilidad lo que, a su vez, le

⁹ Una de las corrientes que se oponía al atomismo era la corriente energética. Uno de los argumentos que usaba para desacreditar a la teoría atómica consistía en cuestionar cómo la mecánica newtoniana, aplicada a procesos reversibles, daba origen a procesos irreversibles.; por ejemplo, la paradoja de Loschmidt afirmaba que era imposible deducir un resultado irreversible, como la segunda ley de la termodinámica, de un conjunto de leyes reversibles.

sirvió para demostrar que la segunda ley de la termodinámica era una consecuencia de ella y de la probabilidad.

Según la teoría molecular del calor, conceptos macroscópicos como presión, temperatura o energía sólo pueden tener una explicación estadística, es decir, que sus valores vienen dados por el promedio de las propiedades mecánicas de las moléculas. Por ejemplo, el valor medio de energía cinética de las moléculas es proporcional a la temperatura. Esto dio pie a que Boltzmann se centrara en dar una interpretación estadística al concepto de entropía.¹⁰ Los pasos que siguió son los siguientes:

- 1) Exigió que la energía se limitase a múltiplos de una cierta cantidad arbitraria E .
- 2) Consideró cuántas moléculas se encontrarían en cada nivel de energía.

Estos elementos lo llevaron a identificar el grado de permutabilidad con la entropía. En donde la permutabilidad es la probabilidad de una distribución de energía, o el número de estados posibles (compleciones o microestados) que dan lugar a la misma distribución de energía. Empero, para ver el papel que tuviese la probabilidad en sus investigaciones hay que desarrollar un poco más cada punto.

La exigencia de limitar la energía venía de la necesidad de evitar que ésta tomase cualquier valor en un cierto rango y que, por ello, convirtiera el número de compleciones en infinitas y, en consecuencia, en incalculables. Para ello utilizó un artificio matemático denominado *discretización*, en el que suponía que la energía de las moléculas dentro de un gas sólo podía tener cierto valor múltiplo de cierto número E . Siguiendo la exposición de Kuhn, la exigencia de dividir el continuo de velocidades o de energía en celdas de tamaño finito (celdas “muy grandes” que contuvieran muchas moléculas) permitía reducir las magnitudes y pasar a la forma integral que caracteriza sus resultados: una forma estrictamente matemática que permitía llevar a cabo la sumatoria de cada distribución y, por ende, volver a valores continuos de la energía. Esta asignación de valores permitió que la energía total pudiese ser calculada como una sumatoria.

¹⁰ Las dos primeras leyes de la termodinámica tienen como magnitudes la energía y la entropía, la energía para la primera y, la entropía, para la segunda, de ahí la importancia dentro de la investigación de Boltzmann.

De fondo, lo que buscaba era la probabilidad de que un gas se encontrara en un cierto estado si se conocían todos los estados posibles, lo que lo llevó a fijarse en las probabilidades de cada distribución de energía y en las combinaciones que daban origen a la misma distribución de la energía total del sistema.

Para conseguir su propósito retomó la función de distribución de Maxwell que proporciona la *probabilidad* de que una molécula elegida al azar se encontrara en un cierto rango de posibilidades. La situación hipotética que introdujo Boltzmann, para llegar a una fórmula que especificara la distribución de energía más probable, se encuentra descrita en la obra de Kuhn antes mencionada. Con el fin de facilitar su comprensión y resaltar sus elementos punto por punto, nos permitimos llevar a cabo su reproducción en forma de lista (Kuhn, 1980, págs. 69-70).

- El primer paso consiste en suponer una urna llena de trozos de papel. Cada papel representa un átomo o molécula.
- El segundo paso consiste en numerar cada trocito de 0 a p .
- Hay que considerar que cada número estará contenido en la urna el mismo número de veces.
- El número de la primera papeleta será aquel que determine el número de elementos de energía a atribuir al primer átomo.
- El punto anterior se repetirá hasta extraer n papeletas.
- El conjunto de n papeletas extraídas constituirá una compleción (o microestado).
- El siguiente paso es reintegrar las papeletas en la urna, volver a mezclar y repetir la distribución de papeletas a átomos.
- Lo que sigue es determinar cuántas compleciones tendrá cada estado posible, quedándose únicamente con las combinaciones que dan lugar a una misma configuración.

Considerando los puntos anteriores, la probabilidad de que se diera cada estado podía ser calculada dividiendo el número de compleciones compatibles entre el número total de compleciones.

Finalmente, en función de unas transformaciones y algunos cálculos que no vienen a tema para el presente escrito, Boltzmann demostró que el logaritmo de la permutabilidad (denominado grado de permutabilidad) es igual a la *función H*, pero cambiada de signo, lo que hace que se pueda utilizar como la medida de la entropía de un sistema. Esto se debe a que *H* es una función que se relaciona con la cantidad que representa el valor medio de una función de distribución. Boltzmann demostró que si la *Ecuación de Boltzmann* era cierta, entonces, *H* tenía que permanecer igual o disminuir para cualquier proceso físico, lo que convertía a la *función H* en el equivalente mecánico de la entropía en función del segundo principio de la termodinámica, según el cual la entropía *aumenta con el tiempo* (o en el caso de un sistema reversible permanece constante) (Penrose, 2002, pág. 368). Concretamente, la interpretación estadística de la entropía de Boltzmann enuncia que *la entropía de un cuerpo S en un estado determinado es proporcional al logaritmo de la probabilidad W de dicho estado*, simbólicamente:

$$S = k \ln W$$

En donde *K* es una constante conocida como constante de Boltzmann e *ln W* el logaritmo neperiano de la probabilidad de que ocurra el estado en cuestión.

Como se puede ver, los métodos estadísticos de Boltzmann y el uso de probabilidades son los que le otorgan el carácter probabilístico a la interpretación de la entropía propuesta por Boltzmann. Tiempo después, el mismo Boltzmann sugirió a Planck, en un artículo de 1897 presentado en la Academia Prusiana de Ciencias, que siguiera sus propios métodos y que adoptara su interpretación probabilística de la entropía, señalando que, *al igual que se ha hecho con la teoría de los gases, también se podría determinar el estado más probable de la radiación* (pág.132).

En la siguiente sección veremos de qué forma el carácter probabilístico de la entropía y la discretización que hizo Boltzmann de la energía, con el fin de encontrar la distribución de energía más probable, influyó en la discontinuidad cuántica inaugurada por Planck a raíz de la ley de radiación.

2.2. Elementos conceptuales que conforman la ley de Planck: origen de la discontinuidad energética

La derivación de la ley de Planck es presentada de formas diversas, lo que ha oscurecido su comprensión y, en consecuencia, la introducción de la discontinuidad en las teorías de la física. Esto se debe a que, según nuestra investigación, su derivación se puede rastrear de al menos cuatro formas, todas ellas con lagunas teóricas distintas, por ejemplo, una de las derivaciones es la derivación de Lorentz, quien trató de fundamentar la ley de Planck y, en el proceso, introdujo elementos que nada tienen que ver con la naturaleza del fenómeno de la luz, con la intención fallida de que la derivación fuera lo más parecida a las teorías clásicas.

Puntualmente, las cuatro formas en las que es presentada la derivación de Planck son las siguientes: la primera, es en función de su presentación ante la Sociedad de física de Berlín el 14 de diciembre de 1900; la segunda, en un artículo enviado a los *Annalen Der Physik* publicado en el año de 1901, el artículo, aunque basado en la ponencia, omitía explícitamente un pasos esenciales de la derivación; la tercera, a partir de la estructura más usual de la derivación o prueba estándar de la ley de Planck proveniente del, también físico, A. H. Lorentz; la cuarta, en función de la derivación de Bose quien presentó una nueva forma completamente cuántica de derivar la ley de Planck de la distribución espectral de la radiación de cuerpo negro.

La comprensión de todas ellas nos da ciertas luces para entender su importancia en el área del conocimiento, pero su exposición no sólo nos llevaría tiempo y espacio, sino que, también, empañaría nuestro objetivo principal, a saber, entender en su justa medida las contradicciones que impuso la ley dentro de las teorías de la física. Por ello nos limitaremos a reproducir sólo una de ellas y haremos uso, si el escrito así lo demanda, de alguna acotación hallada en cualquier otra derivación.

La derivación de la que partiremos es la segunda, el artículo enviado a los *Annalen Der Physik* publicado en el año de 1901, porque es posible subsanar sus lagunas en función de los elementos que nos brinda la presentación de Planck de la derivación de su ley, en 1910.

Por otro lado, la tercera y cuarta derivación serán descartadas casi en su totalidad por las siguientes razones: la tercera, aunque más simple y accesible para aquellos que desconocen

el tema, bloquea la comprensión del enfoque planckiano desviándose a las lagunas teóricas impuestas por Lorentz, no por Planck; la cuarta, al ser una derivación completamente cuántica, ignora los aspectos en los que el enfoque planckiano se separa de las teorías clásicas.

Aclarados los puntos anteriores, es posible comenzar con la presentación de la derivación de la ley de distribución para la radiación del cuerpo negro. Recordemos que en la sección anterior se vio que, por medio de las leyes de Maxwell, Planck consiguió derivar la relación entre la energía de un oscilador, U_ν , y la energía del campo electromagnético, u_ν , según la siguiente ecuación:

$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U_\nu$$

Como en la relación sólo aparece la frecuencia y la constante de la velocidad de la luz, el problema estaba en encontrar la energía U_ν como función de la frecuencia y la temperatura. Para lo cual Planck hizo uso de cinco elementos:

- 1) Interpretación probabilística de la entropía propuesta por Boltzmann.
- 2) Uso del argumento combinatorio.
- 3) Discretización.
- 4) Segundo principio de la termodinámica.
- 5) Teoría electrodinámica

Los elementos teóricos de estos puntos son justamente los que fueron desarrollados en la sección previa. A continuación, veremos de qué forma influyeron en la deducción de la ley de Planck.

Hay que considerar, en primer lugar, que como parte de las especificaciones del sistema de cuerpo negro de Planck, estaba la que indicaba que las paredes de la cavidad estaban compuestas por un conjunto de N osciladores independientes de frecuencia ν , todos vibrando con la misma frecuencia ν , y con una energía total U_n . En segundo lugar, hay que recordar que la segunda ley de la termodinámica permite obtener la relación entre energía y temperatura, a partir de la expresión de la entropía, con la que volveremos en breve, razón

por la cual Planck recurrió a ella, particularmente, a la interpretación probabilística propuesta por Boltzmann, cuya expresión, según lo expuesto, relaciona la entropía S de un sistema con su probabilidad W , simbólicamente:

$$S = k \ln W$$

Como esta ecuación relaciona la entropía de un sistema con su probabilidad, el siguiente paso de Planck consistía en calcular cuántas configuraciones posibles, W , tenía el sistema en cuestión, dada la energía total, U_n , para el conjunto de N osciladores que componía su sistema de cuerpo negro.

El procedimiento para calcular W (número de configuraciones posibles) es el mismo que utilizó Boltzmann para llegar a la distribución más probable de energía, expuesto en la sección anterior (pág. 22). Su uso le permitió a Planck considerar las múltiples maneras en las que la energía total del sistema U_n podía dividirse entre los osciladores de la siguiente forma:

- 1) La división de energía se daba, como lo indica el método de Boltzmann, en P elementos de energía E ; por ejemplo, un oscilador podía tener 1 elemento de energía, otro oscilador dos elementos de energía, otro, tres elementos de energía y, así, múltiples configuraciones.
- 2) La probabilidad viene dada en función de todas las formas en que se puede repartir los P elementos de energía.
- 3) La cantidad total de configuraciones o complexiones, como las llama Planck, resulta del llamado argumento combinatorio o, simplemente, combinatoria.

Aquí es importante resaltar que la división de energía que indica el punto número 1 obedece a la misma exigencia que el método seguido por Boltzmann, en el que se exigía que la energía se limitase a múltiplos de una cierta cantidad E , es decir, Planck supuso que *la energía, compartida por los N osciladores, no pudiese variar de manera continua, es decir, que no fuese una magnitud [...] infinitamente divisible; era preciso tratarla como formada por un número, P , de partes iguales (elementos de energía; ϵ en la notación de Planck [...])* (Sánchez, 2005, pág. 138) y E en la notación de Boltzmann.

Esto quiere decir que, para el caso de los osciladores de Planck, es decir, osciladores que emiten radiación electromagnética, la ganancia o pérdida de energía sólo se da en cantidades discretas (de ahí el nombre de discretización de energía), esto es, en paquetes de energía radiante, y no como lo concebían las teorías de la física clásica, que consideraban que los cambios de energía se daban por vía continua.

Como ya se mencionó, la discretización fue usada previamente por Boltzmann, sin embargo, su introducción en la derivación de la ley de Planck apelaba a un parámetro adicional. Además de suponer que la energía se dividía en elementos discretos de valor E , Planck se vio obligado a suponer que los elementos *debían ser* fijos y proporcionales a la frecuencia, mientras que para Boltzmann, en la teoría de los gases, su valor era *arbitrario*. En la segunda parte del capítulo trataremos afondo este punto, pero antes hay que precisar el papel que tuvo la discretización en la ley de Planck.

Los elementos discretos de valor ϵ , como los llamara Planck, elementos de energía, vienen dados por la expresión:

$$\epsilon = h\nu$$

Esta suposición es conocida como hipótesis cuántica e indica que la energía que radia un oscilador se da en múltiplos enteros de valor $h\nu$ y no en partes fraccionarias de ellas, lo que quiere decir que los osciladores no pueden tener cualquier cantidad de energía, sino cantidades discretas de ella, constituidas en paquetes de energía. Estos paquetes de energía recibieron, posteriormente, el nombre de cuantos de acción.

Haciendo uso de la hipótesis cuántica y el cálculo de probabilidades de los diferentes estados del sistema de osciladores, Planck llegó a la siguiente expresión:

$$S = K \cdot \left[\left(1 + \frac{u}{\epsilon}\right) \cdot \ln \left(1 + \frac{u}{\epsilon}\right) - \frac{u}{\epsilon} \cdot \ln \left(\frac{u}{\epsilon}\right) \right]$$

A partir de ahí, la segunda ley de la termodinámica proporciona la relación entre energía y temperatura de la siguiente forma:

$$\frac{1}{T} = \frac{dS}{dU}$$

En donde T es la temperatura, dS la derivada de la entropía y dU la derivada de la energía. Tras ciertas transformaciones matemáticas (haciendo la derivada y despejando U), y usando la relación entre la energía de un oscilador y la del campo electromagnético, con el que está en equilibrio, obtuvo la distribución espectral de la energía, simbólicamente:

$$u = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{v^3}{e^{hv/kT} - 1}$$

Con esta expresión, conocida como ley de Planck, quedaba resuelto el problema de cuerpo negro, al menos parcialmente, ya que, por un lado, se ajustaba perfectamente a los datos empíricos disponibles y, al mismo tiempo, englobaba a las dos leyes de radiación más importantes de la física: la ley de Rayleigh-Jeans, que explicaba el comportamiento de longitudes de onda grandes, que son las que corresponden a la zona roja del espectro electromagnético, y la de Wilhelm Wien, que se ajusta a longitudes de onda cortas, es decir, a la zona violeta del espectro. El problema es que ninguna de las dos teorías se ajustaba al espectro completo de la forma en la que sí lo hacía la ley de Planck. Empero, por otro lado, la deducción teórica hecha por Max Planck estaba aquejada de graves problemas, entre ellos, el uso injustificado de la probabilidad y, por supuesto, el uso de la hipótesis cuántica. Aunque, las consecuencias del uso probabilístico y la restricción de energía serán trabajadas puntualmente en la segunda parte de este capítulo, es importante resaltar que, la inconformidad de Planck era tan grande, que trató de fundamentar su ley en teorías posteriores sin recurrir a la hipótesis cuántica, que concebía como un artificio matemático conveniente para avanzar en su deducción, ni a la probabilidad, con la intención de prescindir de la discontinuidad energética, por supuesto, sus intentos fueron fallidos. Una de las razones por las cuales su posterior empresa no tuvo éxito, fue por la extensión teórica de la hipótesis cuántica a otros dominios. La relación entre la expresión $\epsilon = hv$ y otros fenómenos físicos se encuentra en el artículo de Albert Einstein, *Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz* (1905). En él, no sólo se amplía la discontinuidad energética a otros dominios de la física, yendo más allá de la radiación electromagnética, sino

que, más que ello, la hipótesis cuántica pierde su carácter de recurso matemático y adquiere un carácter físico. En la siguiente sección se profundizará en cada uno de estos puntos.

2.3. Relación entre los cuantos de energía de Max Planck y las partículas luminosas de Albert Einstein: ampliación de la discontinuidad energética

En la sección anterior se vio que, con la intención de fundamentar la ley de distribución para cuerpo negro, Max Planck introdujo una suposición meramente formal, que consistía en suponer que la energía de radiación se emitía de forma discreta, es decir, en múltiplos de la constante h y no de forma continua, como lo señalaban las leyes de la física clásica establecida hasta entonces. Esta forma particular de cuantizar la energía dio paso a la discontinuidad energética, lo que supuso, a su vez, el tránsito de la física clásica a la física cuántica.

Ahora bien, esta discontinuidad energética de la que hablamos, siguiendo a Kuhn, no hubiese sido asimilada sin uno de los artículos capitales de la física teórica. José Sánchez Ron, por su parte, introduce este mismo artículo para hablar de una segunda discontinuidad. Ambos coinciden en que, sin él, la justificación de la hipótesis cuántica hubiese tomado otro rumbo, quizá uno más largo o uno diferente, lo que hubiese impedido el progreso en las teorías cuánticas¹¹. El artículo del que hablamos lleva por título *Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz*, mejor conocido como el trabajo sobre el efecto fotoeléctrico del físico alemán Albert Einstein.

Tanto en la obra de Kuhn, como en la de Sánchez Ron, se habla de una extensión o ampliación de la hipótesis cuántica en el sentido de que, para Planck, la discontinuidad energética se restringía al intercambio de energía entre osciladores y radiación, y no precisamente a la radiación misma que, según la física desarrollada hasta entonces, era descrita por las ondas clásicas del electromagnetismo, concretamente por las leyes de Maxwell; mientras que, para Einstein, era justamente la radiación (la luz) la que se comportaba como si estuviera

¹¹ El presente escrito no considera la discusión de si fue la primera o la segunda discontinuidad la que cimbró los fundamentos de la física. Ambas se utilizan con el fin de rastrear los elementos discordantes respecto de las teorías clásicas.

compuesta por cuantos de energía múltiplos de la constante h , lo que significa que no sólo la emisión, sino, también, la absorción y propagación de radiación electromagnética se da en paquetes de energía, $E = h\nu$, esto es, de forma cuantizada. En palabras de Sánchez Ron, Albert Einstein *sostenía la existencia de fenómenos que obligaban a pensar que, de alguna manera, la luz, la radiación electromagnética, estaba formada por paquetes independientes de energía, por cuantos que obedecían a la misma expresión introducida por Planck ($E=h \cdot \nu$)* (2005, págs. 169-170). De ahí que la discontinuidad energética que surgía de la obra de Einstein fuera una de corte más general y, en ese sentido, más radical que la que sugería el trabajo de Planck. Esta radicalidad venía apoyada de las demostraciones que hacía Einstein de las consecuencias que tenía el uso de la electrodinámica clásica de Maxwell en el estudio de la radiación, así como de la expresión a la que llegó sin hacer uso de la ley de Planck y que, sin embargo, se corresponde con la hipótesis cuántica, $E = h\nu$.

Respecto al primer punto, Einstein demostró, en la primera sección de su artículo, que las leyes de la física clásica no conducían a la expresión que describía correctamente el espectro de la energía radiante, pues la expresión que surgía de la electrodinámica de Maxwell no se correspondía con los datos empíricos correspondientes a longitudes de onda cortas, es decir, a altas temperaturas. Concretamente lo que predecía la ley que Einstein derivó de principios clásicos, era que la energía crecía indefinidamente con la frecuencia, lo que indicaba que, de ser correcta, los cuerpos calientes radiaran intensamente en el ultravioleta lo que, claramente, no sucede.

Respecto al segundo punto, Einstein llegó a la expresión que describe la entropía de la radiación sin utilizar la ecuación de Planck, ya que, de hacerlo, hubiera dado por hecho la existencia de cuantos de luz. En lugar de ello, hizo uso de la ley de Wien mencionada en la sección anterior, y cuya aplicación se reduce a la zona violeta del espectro electromagnético, es decir, sólo se ajusta a longitudes de onda cortas. A través de ella Einstein concluyó que:

“La radiación monocromática de baja densidad se comporta –en tanto que la fórmula de radiación de Wien sea válida–, en un sentido termodinámico, como si consistiese de cuantos de energía mutuamente independientes de magnitud $R\beta\nu/N$ ” (Einstein, 1905 en Sánchez, 2005, pág. 171).

Al igual que en las secciones precedentes, en las que la exposición demandaba el uso de expresiones físicas, la comprensión de la cita se torna matemáticamente compleja, pero, al mismo tiempo, conceptualmente directa, por lo que, sin la necesidad de exponer la derivación teórica y matemática que llevaron a Einstein a la expresión $R\beta/N$, es posible entender su relevancia en la presente investigación, relevancia que surge de la equivalencia entre $R\beta/N$ y la constante de Planck, h , es decir, $R\beta/N$ tiene el mismo valor que los elementos de energía, cuantos, de Max Planck, lo que sugeriría que la hipótesis cuántica era más que un recurso formal, pues, a través de un proceso alterno (haciendo uso de la ley de Wien) Einstein llegaba a una forma de la misma expresión obtenida por Planck en 1900.

Así pues, con la teoría que había desarrollado hasta este punto y con base en estas consideraciones –es decir, considerando que la radiación se comporta como si estuviese formada por cuantos de energía de magnitud $R\beta\nu/N$ –, A. Einstein desarrolló una explicación, en las tres últimas secciones de su artículo, de un grupo de fenómenos físicos, cuyas regularidades observadas experimentalmente estaban en clara contradicción con la teoría clásica de la luz, pues atendían a un modelo ondulatorio de las ondas electromagnéticas. Entre las explicaciones que dio haciendo uso de la hipótesis cuántica, cuantos de energía, la que más relevancia tuvo fue la del efecto fotoeléctrico, *que es un proceso en el que la superficie de un material emite electrones cuando absorbe energía electromagnética al incidir luz sobre ella* (Sánchez, 2005, pág. 172), razón por la cual el artículo es mejor conocido de esta forma.

La aplicación de la hipótesis cuántica en un grupo de fenómenos experimentales, que incluyen el efecto fotoeléctrico, implicaba, al ampliar su rango de aplicación, que la hipótesis cuántica era más que una conjetura, más que un recurso meramente formal, lo que, en consecuencia, reforzó la idea de que la radiación se comportaba como si estuviera compuesta por cuantos de energía, proporcionándole un carácter general, diferente al que se le adscribió inicialmente, a saber, un carácter meramente hipotético.

En síntesis, la derivación de Einstein de la expresión $R\beta\nu/N$, por una va diferente a la de Planck, así como su aplicación a otros dominios de la física, reflejaron los límites de la física clásica al agotar las formas en las que se podía llegar a un resultado satisfactorio en función

de las teorías establecidas, (leyes de Maxwell) lo que, de forma indirecta, le daba fuerza a la derivación de Planck al sentar los indicios de que la discontinuidad energética es una característica esencial de los sistemas microscópicos, de los procesos de emisión y absorción de radiación y, en consecuencia, reforzando su introducción en las leyes de la física teórica.

Las consecuencias inmediatas de la discontinuidad energética impuesta por la ley de Planck y su posterior ampliación a otros dominios de la física teórica, por Albert Einstein, serán abordadas a continuación.

3. Hipótesis cuántica: Su inconformidad con la física clásica (un esbozo de su carácter epistemológico)

De lo expuesto en los apartados previos emanan una serie de problemas que servirán para entender, finalmente, el carácter epistemológico de la discontinuidad energética en términos de ruptura e incompatibilidad. La cuestión obvia que guía la sección estriba en dilucidar el problema que significó, dentro de la física teórica, el enfoque planckiano. Ello se llevará a cabo, en primer lugar, a la luz de la inconformidad de la hipótesis cuántica respecto de las leyes electromagnéticas, en segundo, a la luz del enfoque probabilístico y, por último, a la luz de las consecuencias que de suyo introdujo la discretización de energía dentro del marco de la física teórica.

3.1. Incompatibilidad con las leyes de Maxwell

La incompatibilidad de la ley de distribución para cuerpo negro de Planck, respecto de las leyes de Maxwell, estriba en dos aspectos: el primero atiende al carácter simétrico de las leyes electromagnéticas y, el segundo, a su carácter determinista.

Para entender el primero, es preciso saber que el carácter simétrico de las leyes de Maxwell radica en que las ecuaciones electromagnéticas son invariantes al invertir el sentido del tiempo, porque atienden a procesos reversibles, del mismo modo que las ecuaciones de Newton. Esto quiere decir que las ecuaciones de Maxwell son invariantes bajo inversión temporal, es decir, que *todos los procesos que las satisfacen pueden transcurrir en ambas direcciones, por tanto, son reversibles* (Kuhn, 1980, pág. 100).

Por otro lado, el segundo principio de la termodinámica, del que hiciera uso Planck para obtener la relación entre energía y temperatura, está caracterizado por la irreversibilidad temporal de la entropía, bajo las restricciones que dictan que sólo puede permanecer constante o, en el caso de un sistema aislado aumentar con el tiempo.

Esto sugiere una contradicción, pues considera procesos reversibles, como los de la electrodinámica clásica, para llegar al cálculo termodinámico en tanto que, de un conjunto de leyes reversibles no se puede deducir un resultado irreversible como la entropía; lo que significa, en última instancia, que el conjunto de leyes clásicas, esencialmente reversibles como las de Newton y Maxwell, no conducen a la ecuación de Planck, lo que implica una incompatibilidad entre ésta y los fundamentos de las teorías físicas precedentes.

Por otra parte, como ya se especificó, el modelo imaginario que utilizó Max Planck consideraba un conjunto de osciladores o resonadores, como los llamara más tarde, gobernados por las leyes electromagnéticas de Maxwell. La justificación del uso de estas entidades venía dada de la ley de Kirchhoff, del mismo modo que su indeterminación, en tanto que la ley postulaba que el campo del cuerpo negro era independiente del material de la cavidad.

Empero, la formulación que desarrolla Planck para pasar de la energía del oscilador a la energía del campo, está dada por un factor de proporcionalidad, lo que significa un problema, no porque las ecuaciones de Maxwell sean aplicadas únicamente a campos, sino, porque, más que ello, siguen siendo ecuaciones de naturaleza determinista, ya que dicen que, para cualquier proceso electromagnético, incluido obviamente el de la radiación de cuerpo negro, las ecuaciones determinan el transcurso temporal de cualquier proceso electromagnético, lo que hace que cualquier consideración ajena a este determinismo matemático esté fuera de ellas, lo que, en consecuencia, deja a la probabilidad, en principio, injustificada.

Así pues, el argumento probabilístico, al menos primigeniamente, entrañó más de una dificultad a la hora de ponerlo en práctica, puesto que su uso implicaba un supuesto sin

justificar¹². Nos referimos al carácter de recurso matemático que tanto Boltzmann como Planck le dieran al implementarlo. Pese a que en el siguiente apartado nos ocuparemos propiamente de lo conflictiva que resultó ser la noción de probabilidad bajo el título de recurso matemático, es preciso enunciar antes que la situación aporética relativa al campo del determinismo, de forma puntual, está en lo que nos dictan las ecuaciones electromagnéticas. Éstas determinan cual debe ser el ritmo de variación con el tiempo de las cantidades pertinentes, en función de cuáles son sus valores en cualquier instante. Este determinismo relativo a los valores futuros en función de los iniciales que, además, dictan el comportamiento para todos los campos electromagnéticos, distan mucho de valores promedio o valores probables. En pocas palabras, lo que indica lo anterior es que, llevar a cabo una demostración y luego describir sus resultados, como lo hizo Planck, en términos deterministas, cuando evidentemente tenía elementos indeterminados, es decir, valores medios, conduce a una contradicción en la forma en la que se cuantifica el fenómeno físico, de ahí que la confianza en la naturaleza predictiva de las leyes físicas se viera amenazada por la base probabilística de la ley de distribución de Planck, al ser el determinismo y la probabilidad contrarios por naturaleza y, al mismo tiempo, queda asentada, nuevamente, la incompatibilidad entre el enfoque planckiano y la física clásica.

3.2. Hipótesis cuántica y probabilidad

Cuando Planck hace uso del mismo recurso matemático que le sirviera a Boltzmann para darle cuerpo a su teoría, se olvida de distinguir entre una distribución de energía en los resonadores de su teoría y una distribución de energía entre las moléculas de un gas. La omisión de este detalle lo lleva a confundir un recurso matemático del sentido físico de la hipótesis cuántica, lo que hace que no sólo la introducción de la probabilidad sino, también, el de aquélla quede, en principio, injustificada en los trabajos que desarrolló Planck, lo que ciertamente no sucede en los que desarrolló Boltzmann. Entender este punto es crucial, porque hacerlo permitirá comprender por qué son los trabajos de Planck, y no los de

¹² Retrospectivamente, es innegable el papel integral que el enfoque probabilístico tiene, no sólo en la derivación de Planck, sino, también, en el resto de las teorías posteriores a la teoría cuántica, sin embargo, la noción de probabilidad no fue aceptada sino hasta pasado el año de 1920.

Boltzmann, los que significaron un problema dentro de la física teórica, incluso cuando ambos hicieron uso de los mismos recursos matemáticos, a saber, el uso de la probabilidad y la discretización de la energía. En esta sección nos ocuparemos de la probabilidad y dejaremos para más adelante a la discretización.

Cuando Boltzmann considera la distribución de energía entre las moléculas de un gas como una condición meramente matemática, la idea viene apoyada de la cantidad ingente de partículas que posee un gas, lo que hace que sólo se pueda tener acceso a sus valores medios y que, en consecuencia, sólo se puedan resolver los problemas inherentes a la teoría de los gases a través del cálculo de probabilidades. Ahora, aunque es cierto que Kuhn lleva a cabo una crítica al uso probabilístico de Boltzmann, es cierto, también, que resalta que su uso no sólo estaba justificado por la teoría atómica, sino que, además, su implementación contaba con el respaldo del teorema de Louville, los trabajos previos de Maxwell y las leyes de Boyle y Charles para gases ideales; ello volvía admisible el uso del cálculo probabilístico siempre y cuando los presupuestos teóricos, así como los resultados, no estuviesen en desacuerdo con las teorías precedentes¹³.

Adicional al soporte teórico del que partía Boltzmann para dar cuenta del uso probabilístico, estaba el hecho de que éste, usado como recurso matemático, estaba apoyado por el significado que se le diera a la *ecuación de Boltzmann* y al *teorema de H* –mencionados en la sección 2.1, como parte fundamental de sus teoría– en tanto que, ambos, al estar determinados por una cantidad relacionada con el valor medio de la función de distribución de Maxwell, aparecían como resultados puramente matemáticos, en dónde su validez dependía del cálculo y no de una situación física real.

Uno de los presupuestos de la primera justificación del uso probabilístico de Boltzmann es que en la teoría de los gases ya era posible encontrar un reconocimiento de magnitudes

¹³ La ventaja que le conferían estas teorías no exentaba de problemas a la teoría de Boltzmann, pero los conflictos venían de las consecuencias de las leyes termodinámicas que él mismo justificó de principios mecánicos y no del uso probabilístico. Probablemente el más relevante sea aquel que surge de aceptar la segunda ley, porque ello desemboca en la llamada muerte térmica del universo, lo que, para gran parte de la comunidad científica, iba en contra de sus pretensiones como científicos.

microscópicas, aquellas de las que sólo se pueden conocer sus términos medios, como ya se explicó previamente, y las macroscópicas, completamente mensurables. Este supuesto, para los fenómenos relativos a la radiación, no estaba del todo justificado hasta la llegada de Albert Einstein.

Aunado a ello, Planck no contaba ni con el soporte teórico ni con las relaciones matemáticas que brindaban los precedentes de la teoría de los gases, para darle sustento al uso probabilístico en su derivación, por lo que la implementación de la probabilidad, necesariamente, tenía que atender a un principio distinto que no se encontraba en ninguna de las teorías clásicas. La búsqueda de esta justificación nos conduce a los trabajos de Albert Einstein, pero requiere, al mismo tiempo, un recorrido por las teorías posteriores hasta llegar a pasados los años veinte, cuando personajes de la talla de Schrödinger, Heisenberg, Dirac, Born, entre otros, lograran fundamentar las teorías cuánticas. Empero, llegar a esa parte no es de suyo indispensable para mostrar cuáles eran los problemas que surgían del uso probabilístico visto desde un enfoque epistemológico.

Hay que empezar por decir que cuando los trabajos de Planck y Einstein salieron a la luz, una de las posturas imperantes dentro de la comunidad científica era aquella que buscaba los principios absolutos que gobernaban el mundo físico; esta postura venía acompañada del carácter que recientemente se le había otorgado al primer principio de la termodinámica, así como de la inmensa cantidad de fenómenos físicos de los que se había podido dar cuenta en los términos deterministas anteriormente explicitados. Ahora, el uso de la probabilidad para definir la entropía implicaba que el segundo principio de la termodinámica se definiera, igualmente, en términos probabilísticos, lo que denotaba un desconocimiento de los valores y condiciones, enteramente determinados, con los que trabajaba la física clásica. Esta interpretación probabilística de los fenómenos de la radiación desembocaba, pues, en el completo abandono del determinismo clásico, en otras palabras, significaba una ruptura con los presupuestos de la física clásica, esto es, con el determinismo que satisfacen las leyes de la mecánica newtoniana, pues ésta atiende a un determinismo matemático que constituye el esqueleto básico de la física clásica.

Aunque la implementación de la probabilidad no sólo trae consigo el abandono del determinismo matemático de la física clásica, para los fines de la presente investigación basta

con lo dicho, para dimensionar, al menos en el sentido más básico, la ruptura que implicaba la ley Planck respecto de las teorías clásicas y poder pasar, de este modo, al siguiente y último punto.

3.3. Hipótesis cuántica y discretización: Implicaciones en la forma de cuantificar los fenómenos físicos

La discretización, al igual que el uso probabilístico tratado como recurso matemático, tiene problemas similares a los enunciados en la sección precedente. El uso que hace Boltzmann de ella al atribuir valores arbitrarios múltiplos de cierta cantidad a la energía de las moléculas dentro de un gas, cuyo único requisito es que satisfagan los presupuestos de la teoría de los gases, no atiende a las mismas condiciones bajo las cuales se rige la discretización en la derivación de Planck. Ésta, además de ser estadística, es *dependiente* de la hipótesis especial, que dicta los límites bajo los cuales se puede cuantificar la energía. En este punto es de suma importancia resaltar que esta dependencia posee un carácter físico que, sin embargo, no puede ser explicado haciendo uso exclusivamente de la teoría de Planck. De ahí la necesidad de ir ligeramente más allá de ella. La injerencia que tuvieron los trabajos de Einstein en la comprensión de la hipótesis cuántica, particularmente, en la comprensión de su sentido físico se halla en *el puente que establecía entre una propiedad ondulatoria, la frecuencia, y otra corpuscular, la energía que había que asignar al cuanto o partícula de luz* (Pérez, 2012, pág. 108).

Este puente que establece Einstein y que no se encuentra en Planck viene de la diferencia entre el elemento de energía de éste y el cuanto de luz de aquél:

“El primero fue introducido específicamente en conexión con el intercambio de energía entre la materia y la radiación en equilibrio termodinámico a determinada temperatura. Einstein identifica al cuanto de luz como la energía de cada partícula asociada a la radiación electromagnética” (Koo, 2005, pág. 40) .

Ya en las primeras páginas de esta investigación se mencionó que la introducción del elemento de energía tuvo, en primera instancia, una aplicación particular y que, posteriormente, éste se convirtió en lo que Einstein identificó como cuanto de luz. La cita anterior refiere justamente a ello, pero, al mismo tiempo, nos dice algo más trascendente y

es que, aceptar la postura de Einstein significaba atribuirle una propiedad corpuscular a la luz, lo que, a todas luces, indicaba el abandono de las ideas imperantes de la mecánica y electrodinámica clásica gobernadas por las leyes electromagnéticas de Maxwell, que consideraban en sus modelos teóricos que la luz se comportaba como una onda electromagnética. Esto evidencia que, si bien el conflicto surge con la cuantización de la energía, al pasar del espectro continuo de energía al espectro discreto (discontinuidad energética), desemboca en un conflicto epistemológico en cuyo núcleo está la necesidad de interpretar el fenómeno de la luz bajo un parámetro diferente, a saber, aquel que dicta la naturaleza del fenómeno de la luz.

Hasta aquí la descripción de los problemas epistemológicos, relativos al conocimiento, que surgieron con la ley de Planck y el uso de la hipótesis cuántica. En el siguiente capítulo le daremos continuidad a estos temas desde una postura más profunda, es decir, desde un análisis que muestre su naturaleza y su vínculo con los fundamentos teóricos de la ciencia física.

4. Conclusiones del primer capítulo

En conclusión, el desarrollo del capítulo dejó ver, por un lado, que a partir del conjunto de teorías de la mecánica, la termodinámica y el electromagnetismo clásico se derivaba una función de distribución para la radiación del cuerpo negro que llevaba al absurdo –demostración hecha por Albert Einstein– y, por otro lado, se vio que, al introducir una hipótesis ajena a los principios de las teorías clásicas se obtenía una función que, hasta hoy, se ajusta a los datos experimentales y que recibió el nombre de hipótesis cuántica –introducida por primera vez por el físico Max Planck–. Su uso tuvo como consecuencia inmediata la discontinuidad energética, al establecer la cuantización de la energía a través de la expresión $\epsilon = hv$. De este modo, la discontinuidad energética, cómo hemos visto, desembocó en una ruptura y en una incompatibilidad respecto de la forma en la que se cuantificaba el fenómeno de la luz en las teorías de la física clásica, que consideraba que los cambios de energía se daban por vía continua.

Puntualmente, la ruptura vino de la indeterminación matemática que suponía el uso probabilístico, así como de las restricciones que impuso la ley de Planck para la

cuantificación de la emisión de energía de un cuerpo negro; la incompatibilidad, por su parte, se encuentra en el carácter determinista de las leyes electromagnéticas de Maxwell y el indeterminista de la ley de Planck. Ambas, la ruptura y la incompatibilidad, descansan, a todas luces, en la estructura matemática que dicta cómo se cuantifica el fenómeno y sugiere un problema, ya sea en la forma de interpretar, o en la forma de formalizar los datos empíricos. En ese sentido, la discontinuidad energética nos dice algo profundo de la realidad física en relación con la naturaleza de la medición y nos hace cuestionarnos por las condiciones bajo las cuales la física trabaja su objeto de estudio en función de un criterio unitario.

La cuestión que sigue es, entonces, analizar los fundamentos de las teorías expuestas en función de la naturaleza de la medición en la física teórica que es, a saber, la que gira en torno a las condiciones que permiten una relación funcional entre la estructura empírica y una estructura matemática adecuada.

Capítulo II: Replanteamiento de la ruptura e incompatibilidad de la ley de Planck respecto de los fundamentos de la física teórica en función de su contenido métrico-operacional

1. Introducción

En el capítulo anterior hicimos un recorrido que mostró como entró la noción de probabilidad y la de cuanto de energía dentro de la física teórica, del mismo modo, se mencionaron algunos de los problemas que ello supuso en relación con los presupuestos de la física clásica. Entre estos problemas se encuentran aquellos que sugieren una ruptura con el determinismo satisfecho por la física clásica que, además, se relacionan estrechamente con aquellos que apelan a la forma discontinua de cuantificar el fenómeno de la luz.

En este capítulo empezaremos por defender que los conflictos que sugirió el uso probabilístico y el abandono del determinismo, dentro de la física teórica, no son sustanciales en relación con los fundamentos de la física, con lo que conseguiremos descartar estos dos primeros sentidos en los que se plantea la ruptura e incompatibilidad de la física moderna, inaugurada con la hipótesis cuántica, respecto de la física clásica.

Acto seguido, profundizaremos en la noción de discontinuidad en relación con la discretización de la energía (es decir, con la dependencia de la ley de distribución de la energía respecto de la hipótesis especial de Planck) en función de la estructura métrico-operacional de la física teórica y el significado físico del cuanto de acción.

Es importante entender que, antes de pasar a las condiciones métrico-operacionales de la física teórica, aquellas que presumimos forman parte de los fundamentos de la física teórica, es menester clarificar las discrepancias entre los conflictos de carácter epistemológico, expuestos en relación con la postura determinista, y la cuantificación de la emisión de energía en relación con la estructura métrica de la física teórica. En la medida que logremos lo anterior, conseguiremos disociar lo añadido extrateórico, como pretensiones científicas, ideologías e inclinaciones teóricas que determinaron el rechazo de la ley de Planck, de lo propiamente científico, es decir, lo concerniente a la cuantificación y conceptualización de fenómenos físicos, en este caso, el fenómeno de la Luz. El desarrollo del capítulo mostrará

que parte del rechazo que ejercía la comunidad científica, respecto de la ley de Planck, surgía a raíz de que su justificación teórica se separaba de la imagen usual de ciencia, basada en la noción de determinismo matemático, debido a la indeterminación, dado por el carácter de probabilidad de la ley de Planck.

2. Replanteamiento de las consecuencias epistemológicas de la discontinuidad: Dogmatismo epistemológico e incompletud en la física teórica

Se ha mencionado, anteriormente, el rol que jugó el determinismo matemático dentro de las teorías de la llamada física clásica, un determinismo inherente a las leyes de Newton y Maxwell, el cual podemos entender mediante su principal característica, aquella que estriba en la obtención de valores futuros en función de datos iniciales en un instante dado. El problema del uso de la probabilidad, como se indicó en la última parte del capítulo pasado, está en que no obedece a lo anterior. En el caso específico de la ley de Planck, el uso de la probabilidad atribuye un valor *indeterminado* a la emisión de energía.

Para entender de qué manera afecta el grado de indeterminación, impuesto por la ley de Planck, a los fundamentos de la física, hay que poder distinguir la connotación teórica y la connotación extrateórica de las consecuencias intrínsecas a la hipótesis cuántica, razón por la cual este tema será atacado desde dos frentes: el dogmatismo epistemológico basado en el determinismo y la incompletud de las teorías físicas como consecuencia de la indeterminación cuántica. A continuación, pasaremos a desarrollar cada punto.

Rescatando los elementos tanto históricos como teóricos, el primer capítulo de esta investigación muestra que el surgimiento de la física moderna no es, por mucho, una maduración conceptual de la física teórica, sino que surgió a contrapelo de la mentalidad dominante. La connotación determinista de las teorías clásicas entraba en oposición con las restricciones impuestas por la ley de Planck, y el uso injustificado de la probabilidad, (representada por el paso de la energía del oscilador al del campo, dado por un factor de proporcionalidad), lo que significó un rompimiento con los presupuestos de la física, pero ¿con qué tipo de presupuestos estamos tratando?

Analicemos una vez más las consecuencias del abandono del determinismo. La discontinuidad impuesta por Planck en el espectro de radiación de cuerpo negro, aunque

minúscula en comparación con las cantidades involucradas en procesos macroscópicos, resultó importante, justamente, *por afectar al nivel más básico conocido de la realidad* (Arana, 2012, pág. 20).

Esto desembocó en un conflicto epistemológico que descansaba en la lectura que se hacía del mundo físico determinista e indeterminista a la vez, pues había dos modelos distintos que buscaban explicar el mismo fenómeno físico, la emisión de energía. El primero de ellos, como vimos en el desarrollo del primer capítulo, concebía la emisión de energía como onda y la cuantificaba por medio de cantidades continuas, mientras que, el segundo modelo, concebía la emisión de energía como partícula, a raíz del trabajo de Albert Einstein, y la cuantificaba por medio de cantidades discretas regidas por el cuanto de acción. La cuantificación discreta de la emisión de energía impuso un modelo del universo diferente al que subyacía a las teorías clásicas, caracterizado por la universalidad de sus leyes y el carácter de precisión de sus datos y sus predicciones. En otras palabras, el mundo empírico al que se enfrentaban, a raíz del indeterminismo, obligaba a los físicos teóricos a conferir un nuevo orden a los datos obtenidos que considerara no sólo el carácter determinista de las leyes clásicas, sino, también el carácter indeterminista que surgía de la hipótesis cuántica. Recordemos que la hipótesis cuántica restringe la cuantificación de la luz a cantidades discretas y que la ley de Planck se deriva de factores de proporcionalidad, estas dos restricciones limitan el acceso a los valores precisos, deterministas, con los que estaba acostumbrada a trabajar la física clásica.

Aquí es importante aclarar que, aunque es cierto que la incertidumbre forma parte de la obtención de datos y, en ese sentido, de la obtención de resultados, los modelos de la física clásica no contaban con un impedimento o restricción, impuesto por el fenómeno físico, para idealizar casos en los que las condiciones ideales les permitieran encontrar regularidades empíricas. El límite estaba, en todo caso, en los instrumentos y técnicas de medición, por lo que las restricciones que imponía la hipótesis cuántica en la cuantificación de energía eran distintas de aquellas con las que la física clásica estaba acostumbrada a trabajar.

Ahora bien, el problema de fondo estaba en saber si con este nuevo modelo, con todo y sus restricciones, se conseguía avanzar en el conocimiento del mundo empírico de la misma forma y con los mismos criterios que antaño. Juan Arana nos dice al respecto:

“Desde el punto de vista filosófico la cuestión a decidir es sí, como pretenden sus más destacados creadores, los límites impuestos por la mecánica cuántica a la determinabilidad de la realidad son o no son los mismos que los límites objetivos de los conceptos físicos clásicos en general” (2012, p. 43).

La física clásica trabaja con conceptos a los que se les puede atribuir una “ilimitada” precisión al momento de otorgarles valores numéricos, ya que la aproximación al fenómeno físico, como ya mencionábamos, radica en los métodos de medición, de tal suerte que a mayor exactitud en las mediciones, mayor aproximación al hecho empírico. Por su parte, las restricciones de la discontinuidad energética en procesos subatómicos impiden que las mediciones sean precisas, en el sentido de que están determinadas por las restricciones de la hipótesis cuántica y, como consecuencia, las teorías de la física moderna se ven obligadas a trabajar con valores medios, valores probables. Estas restricciones no sólo ponen un límite a las posibilidades de investigación científica, también lo hacen a las posibilidades de acceder al entramado de leyes físicas y, en consecuencia, al conocimiento del mundo empírico, en tanto que, esta nueva forma de abordar el objeto sugiere una restricción para la obtención de conocimiento, ya que las predicciones que se deducen de estimaciones probabilísticas parecen indicar que no hay leyes precisas en el mundo empírico (en el sentido de que no son matemáticamente deterministas) a las que podamos tener acceso.

Para entender tales restricciones hay que tener en cuenta que la noción de determinismo se liga con la idea de que todo lo que sucede en el mundo, al menos en el mundo empírico, resulta de las condiciones previas o condiciones iniciales, pasadas o presentes, por medio de las cuales es posible prever acontecimientos futuros y que, en principio, constituye la posibilidad de acceder al entramado de leyes físicas.

Esta forma de entender el conocimiento científico, el conocimiento físico, parte de la metodología que implementó Galileo, a quien se le considera como el padre no sólo del método científico, sino de la ciencia moderna (aquella que se separa de la noción de ciencia aristotélica), pero tiene su culmen en la obra de Newton: la precisión de sus leyes y la universalidad de sus principios marcaron el camino que transitarían comunidades científicas enteras. Este camino estaba enmarcado por la precisión de los datos empíricos que otorgaba, en consecuencia, precisión en los resultados.

El principio general que gobernaba esta relación entre datos y resultados estribaba en la sustitución del lenguaje de la observación empírica, por el lenguaje de los números, en donde había una relación entre el hecho concreto que se observaba y la sustitución que se hacía de él por cálculos y razonamientos matemáticos. La belleza de las teorías de Newton no sólo estaba en la precisión de sus resultados y en los fenómenos empíricos que lograban explicar sus leyes, sino que, también, estaba en la elegancia de sus ecuaciones. La relación entre el hecho empírico y las ecuaciones estaba, pues, en la traducción de hechos empíricos a valores numéricos. El objeto físico se definía matemáticamente (aritmética o geoméricamente), a través de la medición de propiedades físicas, por lo que la aproximación al hecho empírico radicaba, precisamente, en los métodos de medición, cada vez más novedosos y de mayor alcance. El conocimiento del entramado de leyes físicas se veía, en principio, como algo posible a través de la determinación de los valores numéricos de las propiedades físicas.

Esta relación entre hechos empíricos y valores numéricos, en parte, era lo que conformaba el ideal al que la ciencia aspiraba y, en gran medida, aún lo hace. El ideal científico tenía como pretensión la claridad y la simplicidad de sus datos, leyes y teorías. Estas pretensiones se obtenían por medio de un lenguaje capaz de asignar un significado fijo a cada signo, un significado único y preciso. Esta claridad y precisión sólo podía alcanzarse mediante un lenguaje matemático (Cf., Duhem, 2013).

De manera que, de la indeterminación, a la luz de la hipótesis cuántica y el uso de recursos probabilísticos, surge inevitablemente la pregunta ¿Qué tan precisas y claras pueden ser las leyes que se derivan de factores de proporcionalidad? Es decir, preguntémonos qué sucede cuando hay una imposibilidad de determinar dichas condiciones numéricas. Los límites, obviamente, repercuten en la precisión predictiva, lo que se torna significativo si consideramos que dentro de las pretensiones de la física estaba la de conseguir leyes más constrictas y cálculos más exactos. Esto sugiere el porqué de la resistencia de los físicos a abandonar el determinismo imperante de la visión clásica.

Empero, este determinismo, más que formar parte de las teorías científicas, era una interpretación que se hacía del conocimiento que surgía de ellas, en el sentido de que las leyes mostraban una relación entre la causa que daba origen a determinado hecho empírico y que

esa causa y ese hecho podían ser traducidos al lenguaje matemático sin más restricción que la impuesta por los aparatos de medida.

En otras palabras, la idea de determinismo trascendía los métodos de observación y medición que utilizaba y, aún utiliza, la física. La pregunta en torno a si el mundo empírico es determinista o no, no es una pregunta que pueda responder la física teórica, en tanto que su objeto de estudio no es la naturaleza, en sentido ontológico, del fenómeno físico. El determinismo no se deduce matemáticamente de una ley o principio de la física teórica. En última instancia, el determinismo no es más que un atributo de las leyes clásicas, una característica observable de sus teorías, pero no es parte de su constitución, es decir, no es lo que les da un carácter de generalidad o universalidad, este surge, en todo caso, de su relación con el objeto físico y su carácter predictivo.

La esencia que subyace al debate sobre el determinismo se encuentra, pues, en entenderlo como una característica en sí del mundo empírico, del mundo que se describe y se trata de conocer, el determinismo se muestra como una postura frente al mundo que nos dicta como es éste y como debería ser, pero, sobre todo, de qué tipo es el conocimiento que obtenemos de él. El determinismo matemático que se corresponde con los hechos empíricos y que proporciona predicciones matemáticamente precisas, sin valores intermedios a lo que físicamente no podamos tener acceso, se coloca por encima de un indeterminismo matemático que, en principio, restringe el acceso al fenómeno físico y, por ende, pone límites al conocimiento impuestos por el fenómeno mismo, en este caso, el fenómeno de la emisión de energía.

La corrupción a este principio determinista, a la luz de la discontinuidad energética, inevitablemente, alteró la constitución epistémica de las teorías, en el sentido de que impuso una nueva forma de trabajar el objeto físico caracterizada por un grado de indeterminación y, al mismo tiempo, obligó a pensar en una forma diferente de entender el conocimiento de la realidad empírica.

La idea anterior toma su justa dimensión, si se comprende que el conocimiento que proporcionaban las leyes físicas fue concebido, en principio, como aquel capaz de revelar las leyes que gobiernan el mundo empírico basado en un principio de universalidad y en la

creencia de la existencia de regularidades empíricas, basadas, a su vez, en la “conurrencia” de determinadas circunstancias que dan lugar a determinadas consecuencias. El determinismo matemático, en este sentido, era inherente a la forma de encontrar y representar esas regularidades, en tanto que los datos proporcionados para un instante inicial podían determinar la solución para cualquier otro instante, lo que permitía encontrar dichas regularidades, es decir, si se producían ciertos hechos determinados matemáticamente, se producirían ciertas consecuencias matemáticamente determinadas. Por el contrario, la ley de Planck es, en última instancia, sólo probabilidades, por lo que la brecha impuesta por el indeterminismo al conocimiento empírico está, justamente, en que las regularidades se ven mermadas por un carácter de proporcionalidad lo que, en consecuencia, orilla a replantear la idea de universalidad y regularidad dentro de los cánones clásicos de la física teórica.

Hasta aquí, sin embargo, sigue sin ser claro de qué manera las restricciones cuánticas afectan al esqueleto conceptual de la física teórica, más allá de sólo romper con una postura, si se quiere bien fundamentada, que dicta cómo es el mundo y cómo accedemos a él. Con el fin de esclarecer de qué manera las restricciones cuánticas, impuestas por la ley de Planck, son realmente significativas hay que considerar una forma más de tratar con el indeterminismo.

Empecemos por considerar que la determinación del valor exacto de una propiedad física susceptible de cuantificación (magnitud), la que sea, *permite afirmar la existencia de un referente empírico correspondiente a esa magnitud* (Sánchez, 2007, pág. 37) lo que deja a cualquier magnitud indeterminada sin su contrapartida empírica justificada. Este es justo el núcleo de la incompletud de las teorías físicas planteado por A. Einstein, B. Podolsky, y N. Rosen, (1935). En esta postura, la indeterminación se centra no sólo en la cuantificación, sino, también, en la forma en la que se conceptualizan las propiedades físicas, llevándola (la indeterminación) de la medición a la interpretación misma.

Lo anterior, en términos métricos, es decir, es relación con magnitudes físicas, sugiere que el problema está en la forma en la que se cuantificó y formalizó la magnitud de la emisión de energía, en tanto que parece que su referente no es el mismo dentro de las teorías de la física, además de que puso de manifiesto nuevos aspectos que debían tomarse en cuenta dentro del proceso de conceptualización. Este, aunque es un problema, principalmente, de corte ontológico los filósofos de la ciencia, como Ulises Moulines y Carmen Sánchez, le han

tratado de dar respuesta desde dos enfoques distintos. Uno de ellos apela a que el problema no es intrínseco a la física cuántica, sino, a la física clásica, pues es ésta quien no contempla en sus metrificaciones la posibilidad de la existencia de una propiedad física intrínsecamente indeterminada, como la emisión de energía (Sánchez, 2007, pág. 42), por lo que, la indeterminación de la magnitud de acción se da en relación con los cánones clásicos de cuantificación y conceptualización de la física clásica.

En ese sentido, el conflicto pasa a formar parte de las teorías clásicas y consiste en querer cuantificar magnitudes mecánico-cuánticas, (en este caso la emisión de energía), de carácter indeterminado en condiciones mecánico-clásicas. Esto, aunque ciertamente es un tema importante que debe ser tomado en consideración, no indica una ruptura teórica, sino que pone en evidencia el carácter inacabado de la física.

Otra posible respuesta se encuentra en la división de los términos teóricos que hace Carmen Sánchez, partiendo de la obra de Ulises Moulines, en donde enfatiza en las diferencias de términos teóricos según el referente que conceptualizan, entre ellos, están los que define como observables por propiedades; estos términos son característicos de las teorías subatómicas tales como fotones, neutrones o positrones. Aunque los términos teóricos observables por propiedades no pueden ser observados directamente por ningún medio, su contrapartida empírica viene designada por la *función o estado propio del observable en cuestión* (Sánchez, 2007, pág. 37), volviéndolas magnitudes que la teoría puede medir.

Con esta información podemos decir que, si bien la indeterminación matemática, a la luz del uso probabilístico, trae consigo cuestiones filosóficas que pueden desembocar en la incompletud de las teorías físicas, éstas son independientes de las teorías físicas concretas, es decir, son cuestiones de corte extrateórico. Esta distinción entre una idea preconcebida (la noción de determinismo matemático como característica de la leyes físicas) y un elemento inherente de la estructura matemática de las leyes, como lo es la conceptualización y cuantificación de una propiedad física, nos lleva a separar entre las razones que motivaron a la comunidad científica a rechazar la ley de Planck, razones de corte ideológico o personal, basadas en una postura determinada respecto del conocimiento científico, de las razones estrictamente teóricas, aquellas que se relacionan con los fundamentos de las teorías físicas. Lo que, en consecuencia, nos lleva a distinguir la naturaleza de los problemas planteados en

el primer capítulo. Por un lado, tenemos aquellos problemas que parten de la idea de determinismo como característica de las leyes físicas y, por el otro, los problemas que se centran en la derivación de la ley de Planck respecto de las leyes clásicas. Los primeros, basados en el determinismo matemático, quedan relegados a problemas que, en última instancia, no pertenecen, propiamente, a la derivación y justificación de la ley de Planck, es decir, a su relación con las teorías de la física clásica.

Esto no quiere decir que se trate de desestimar las implicaciones que el abandono del determinismo tiene en la imagen del mundo físico, concebida por años y basada en los resultados que las teorías clásicas, de carácter determinista, proporcionaron por décadas. La intención es hacer notar que es, justamente, esta imagen determinista la que hizo parecer discrepante la concepción del mundo empírico al asumir que el determinismo matemático era parte de la estructura de las leyes físicas. En otras palabras, el rechazo de la ley de Planck por parte de la comunidad científica, y por el mismo Planck, se centraba en que la forma discontinua de cuantificar la luz se separaba de los cánones clásicos o ideales científicos clásicos, completamente deterministas, de la física teórica, sólo porque las leyes que explicaban el fenómeno de la emisión de energía eran de carácter indeterminado.

En ese sentido, las discrepancias, al menos en principio, no se vinculan con los fundamentos de la física, sino con la imagen del mundo físico desarrollada y alentada por la comunidad científica. Los fundamentos de la física, presumimos, se vinculan con el proceso de cuantificación y conceptualización, así como con la estructura métrica de las leyes físicas, por lo que entender la discontinuidad energética en términos de ruptura o incompatibilidad, en los términos antes planteados, resulta ser un falso dilema y nos conduce a replantear la continuidad de la física teórica respecto de la estructura métrica de las teorías físicas. A continuación, pasaremos a desarrollar esta idea.

3. Discontinuidad energética en función de la estructura métrica-operacional de la física teórica

En la sección pasada abordamos la ruptura de la ley de Planck respecto de las teorías clásicas a la luz del uso probabilístico y de la noción de determinismo matemático. Lo que toca, ahora, es abordar el problema desde el significado físico del cuanto de acción de Planck. Entendemos por significado físico aquel que relaciona una magnitud nueva con el complejo

de magnitudes previamente introducidas y justificadas dentro de las leyes físicas¹⁴, por lo que las discrepancias que introdujo la hipótesis cuántica en relación con los presupuestos de la física clásica serán abordadas en función de un enfoque magnitudinal, esto es, a partir de la estructura métrica que interviene en la derivación de la magnitud de acción.

Como vimos previamente, uno de los problemas de la ley de distribución de cuerpo negro de Planck estaba en el carácter *ad hoc* de su hipótesis; esta suponía que la radiación se emitía de forma discreta, es decir, que lo hacía en porciones múltiplo de una cantidad constante h . La hipótesis que en principio fue concebida como un recurso meramente formal, cobró significado como magnitud de acción cuando Albert Einstein la amplió y demostró que no sólo la emisión, sino, también, la absorción y la propagación de la radiación se da en forma cuantizada, esto es, como un conjunto de partículas cuya energía es $E = h\nu$, donde ν es la frecuencia. Conocer el significado físico del cuanto de acción en términos magnitudinales, nos permitirá entender en qué sentido su derivación nos permite hablar de una continuidad teórica dentro de la física.

Para este propósito es preciso conocer el papel de los conceptos métricos dentro de la configuración de la física teórica y, en función de ello, comprender en su totalidad la noción de significado físico que maneja Carmen Sánchez y que entiende como el contenido métrico-operacional de una magnitud que se deriva de otras magnitudes. Esta definición será acotada y explicada en las siguientes páginas y nos permitirá entender cuál fue el proceso de derivación de la magnitud de acción. A continuación, abordaremos este punto.

3.1. El papel central de los términos teóricos métricos dentro de las teorías físicas

La física cuenta con herramientas teóricas que le permiten manejar de forma simbólica el comportamiento de su objeto de estudio, esto es cuando, por medio de la asociación de números con propiedades físicas¹⁵, establece una relación entre lo empírico y lo numérico y,

¹⁴ Más adelante retomaremos la noción de significado físico en función de la definición que da Carmen Sánchez.

¹⁵ Las propiedades físicas de las que aquí se habla son aquellas que se encuentran en los objetos físicos (constituidos por materia y energía) que pueden ser medibles, por ejemplo, la distancia entre un punto y otro de una regla; y se discriminan todas aquellas que no lo son, por ejemplo, las propiedades cualitativas, como la belleza o la bondad.

a raíz de ello, conceptualiza objetos o procesos físicos por medio de operaciones matemáticas. Operar con estas herramientas implica un proceso indisolublemente híbrido determinado por (1) la medición de propiedades físicas (cuantificación) y, (2), la determinación de esas propiedades (conceptualización).

Entendemos como *conceptualización* el proceso de metrización por el cual se lleva a cabo la asignación de términos teóricos a propiedades físicas. Los términos teóricos que incorpora este proceso son usualmente conocidos como conceptos métricos o magnitudes¹⁶; los conceptos métricos son aquellos conceptos que denotan propiedades físicas medibles, en donde la asignación de números a propiedades físicas permite operar como si operásemos con los objetos mismos, en palabras de Carmen Sánchez:

“Los conceptos métricos se introducen como funciones numéricas que asignan valores numéricos a las propiedades físicas cuantificables, matematizando nuestro conocimiento de la naturaleza” (2007, pág. 43).

En la introducción de conceptos métricos, por medio de la metrización, es justamente en donde se ve claramente el carácter híbrido, de cuantificación y conceptualización, del que depende el manejo simbólico del que hablábamos en un principio, y que caracteriza a la física teórica matematizada.

Ahora bien, en el caso específico de la ley de Planck, la introducción de una nueva magnitud, el cuanto acción, vino de la mano de la cuantificación de la emisión de energía, que pasó de ser una propiedad continua a una discontinua. Esta peculiaridad en la cuantificación indicó un nuevo aspecto a considerar dentro de la conceptualización, en tanto que puso de manifiesto propiedades físicas intrínsecamente indeterminadas (como la emisión de energía), lo que, en consecuencia, alteró el proceso de metrización, en tanto que el fenómeno de la emisión de energía se concebía como una propiedad cuyas cantidades se representaban continuamente.

¹⁶ Los términos teóricos, siguiendo a Carmen Sánchez, contemplan a los conceptos ficcionales o idealizaciones, a los conceptos inobservables con referente real, a los términos hipotéticos y a los conceptos métricos (Cf. Sánchez, 2007), sin embargo, dada la empresa del presente discurso no es posible, ni necesario, profundizar en cada uno de ellos, pero no está de más hacerle saber al lector la existencia de estas categorías dentro de los términos teóricos con el fin de evitar enojosos malentendidos.

Recordemos que una cantidad continua es aquella a la que se le puede atribuir cualquier valor dentro un rango finito. Este hecho, el paso de la cuantificación de la emisión de energía continuamente a discontinuamente, dejó a la hipótesis cuántica, en principio, injustificada, porque, en apariencia no había una relación métrica entre el cuanto de acción y las magnitudes de la física clásica que trabajaban con cantidades continuas.

Este problema es tratado por Carmen Sánchez en su tesis Doctoral *Análisis magnitudinal y la estructura métrica de la mecánica cuántica* (2007), en ella propone un enfoque métrico operacional para tratar el significado de las magnitudes de la mecánica cuántica, específicamente, su núcleo teórico: el cuanto de acción. La comprensión de este enfoque, así como su precisa aplicación a la investigación presente, requiere esclarecer tres nociones clave que se relacionan con el contenido métrico operacional de un sistema teórico. La primera consiste en acotar la noción de significado físico en relación con los términos teóricos métricos; la segunda, en distinguir los tipos de metrización por medio de los cuales se introducen magnitudes nuevas, con el fin de distinguir cuáles de ellas son susceptibles de interpretación física; y, finalmente, entender el alcance del análisis dimensional en conjunción con el análisis magnitudinal, propuesto por la autora, para determinar el grado de derivación de una magnitud del tipo de la magnitud del cuanto de acción introducida por la ley de Planck. En la siguiente sección discutiremos a fondo cada punto.

3.2. Contenido métrico operacional y significado físico

La noción de significado físico, al igual que muchas otras en filosofía, resulta ambigua si no es acotado el marco en el cual se lleva a cabo su implementación. La carga teórica en sentido filosófico que trae consigo esta noción nos hace pensar en ella ontológica o epistemológicamente, es decir, en relación con un referente empírico o en relación con su caracterización epistémica, llevándonos a adoptar, necesariamente, una postura realista o instrumentalista que otorgue significado a los términos teóricos con los que trabaja, en este caso, la física teórica. Sin embargo, no hay que olvidar que lo que se pueda decir ontológica o epistemológicamente de las magnitudes físicas, entra en los criterios físico-filosóficos sin, por ello, dar una caracterización en sentido físico-matemático. Esta última viene dada por la cuantificabilidad y medibilidad de la propiedad física que se metriza, así como de su relación con las magnitudes que intervienen en la ecuación en la que es introducida.

Esta falta de relacionalidad fue justamente uno de los problemas que trajo consigo la ley de Planck que, de forma puntual, fue planteada en la última sección del capítulo pasado, como una ley que no podía ser derivada de las teorías de la física clásica. Por esta razón, es justo desarrollar la noción de significado físico en sentido físico-matemático, al menos en primera instancia, para entender la génesis del problema real.

Para este propósito, la literatura concerniente a la filosofía de la ciencia ofrece varias alternativas que se centran en la estructura de las teorías físicas matematizadas, y que parten de los elementos que constituyen una teoría, entre los que se encuentran, por ejemplo, la parte formal, la parte interpretativa, la contrastación de hipótesis e, incluso, algunos dirán que las comunidades científicas y los intervalos históricos en los que se desarrollan las teorías¹⁷. La razón por la cual no es necesario introducirnos en esta discusión radica en que no es el propósito de esta investigación decantarnos por una u otra postura, ni dar argumentos a favor, o en contra, en función de las ventajas o deficiencias que determinadas corrientes nos ofrecen para la comprensión de la estructura de las teorías físicas. Carmen Sánchez, en la obra ya citada, habla de esta situación y hace explícito el conocimiento que tiene del tema, pero, al mismo tiempo deja claro que, independientemente de la postura, todas ellas reconocen que las teorías físicas poseen, al menos, una parte interpretativa y una parte formal desde la cual es posible entender el entramado de leyes físicas, por esta razón su noción de significado físico es relativa a los elementos cuantitativos y conceptuales, elementos que ya tuvimos oportunidad de explicar previamente en relación a la cuantificación y conceptualización de propiedades físicas, motivo por el cual haremos uso de la definición que nos otorga su investigación doctoral.

Nuestra autora entiende la noción de significado físico como el *contenido métrico-operacional de una magnitud derivada* (Sánchez, 2007, pág. 18), lo que indica un uso restringido del significado físico, pues sólo está referido a los términos teóricos métricos o magnitudes físicas, descartando el estudio del contenido no métrico operacional y el significado de términos teóricos no métricos como las abstracciones (por ejemplo, la noción de posición), o los términos teóricos hipotéticos (como la noción de cuerda, gravitón o

¹⁷ Véase, por ejemplo, la obra de Thomas Kuhn, *La estructura de las revoluciones científicas* (1971).

monopolo magnético (Cf., Sánchez, 2007, pág. 38). El contenido métrico operacional, a su vez, está determinado por conceptos métricos y por las relaciones que guarda una magnitud con los conceptos que intervienen en su metrización, estas relaciones las podemos encontrar como leyes empíricas.

Una peculiaridad de entender el significado físico en función del contenido métrico operacional de una magnitud está en que nos brinda una forma específica de interpretar los conceptos métricos, Carmen Sánchez lo enuncia de la siguiente forma:

“La interpretación de un concepto métrico [...] es la determinación de su significado en función de su relación funcional con los conceptos introducidos en su metrización, esto es, en función de su contenido métrico-operacional” (2007pág. 11).

Como podemos ver, las nociones de significado físico, contenido métrico operacional e interpretación de una magnitud física se relacionan entre sí, haciendo posible la introducción de nuevas magnitudes de un modo justificado. Esto quiere decir que cuando hablamos de la interpretación de un concepto métrico, estamos pensando en el significado físico que posee una magnitud en función de los términos teóricos que le preceden y que constituyen la teoría de la cual forman parte y de la cual(es) es derivable.

Concebir la interpretación de conceptos métricos en este sentido tiene como finalidad, por un lado, establecer una conexión entre lo matemático y lo físico que viene del carácter dual, cuantitativo y conceptual, de la introducción de este tipo de términos teóricos y, por el otro, establecer un criterio que justifique la introducción de términos teóricos métricos nuevos. Esto es importante, porque deja ver que la introducción de términos teóricos métricos no es un capricho teórico o un recurso meramente conveniente para avanzar en la explicación de un fenómeno físico, por el contrario, su introducción depende de su relación con otras magnitudes.

La conexión entre lo matemático y lo físico y un criterio de justificación de términos teóricos indirectos, beben de la relación que hay entre los valores numéricos y el significado físico que poseen dentro de una ecuación, es decir, de su cuantificación y su conceptualización. La forma en la que se cuantifican determina la forma en la que se conceptualizan, lo que, por ende, nos deja tipos de metrización. Ahora bien, el puente del que hablamos se encuentra

mayormente en las metrificaciones *indirectas* o *derivadas*, dado que son éstas las que intervienen en los procesos más sofisticados de la física teórica y que explicaremos a continuación¹⁸.

El proceso de metrización del que hablamos previamente, y por medio del cual se lleva a cabo la conceptualización de propiedades físicas, es categorizado por Carmen Sánchez en función de los diferentes modos que emplea la física para llevar a cabo el proceso de cuantificación. Entre ellos distingue dos, medición directa y medición indirecta. Éstas, a su vez, establecen dos formas de metrización: metrización fundamental y metrización derivada, respectivamente.

La metrización fundamental consiste en asignar valores numéricos a propiedades físicas susceptibles de cuantificación de forma directa, es decir, a partir de los datos empíricos. Por su parte, los conceptos métricos introducidos de forma derivada son dependientes de otros conceptos métricos introducidos previamente. Los primeros conforman la base magnitudinal por medio de la cual es posible derivar los segundos; esto quiere decir que hay una distinción entre magnitudes base y magnitudes derivadas que, en conjunto, forman el sistema de magnitudes de toda la física teórica.

Con las primeras volveremos ampliamente en el siguiente capítulo, cuando hablemos de la invariabilidad de las magnitudes base canónicas de masa, longitud y tiempo, en esta sección las que nos interesan esclarecer son las segundas, dado que la magnitud del cuanto de acción es de este tipo y es preciso entender de qué manera su carácter de magnitud derivada proporciona una salida a los problemas planteados en la primera parte de esta investigación.

Ahora bien, existen cuatro formas de introducir términos teóricos métricos de forma indirecta, es decir, de metrización derivada: Metrización por ley, metrización indirecta,

¹⁸ El objeto de la física teórica ha ido de lo macrofísico a lo microfísico, por esta razón las magnitudes fundamentales como la masa, la longitud y el tiempo no alcanzan para explicar los fenómenos físicos, cada vez más complejos, a los que se han tenido que enfrentar los científicos, por lo que ha sido necesario, casi desde los primeros años de la física matematizada, introducir magnitudes que no surjan de una medición directa, como la longitud de un cuerpo, es decir, la distancia entre un punto y otro. Por esta razón, las magnitudes derivadas son las que intervienen en los procesos más sofisticados de la física.

metrización por definición y metrización sin eliminabilidad (Cf. Sánchez, 2007, 48-53) De ellas, *sólo la metrización por definición es susceptible de interpretación física* (Sánchez, 2007, pág.51), esto quiere decir que sólo por medio de la metrización por definición es posible determinar el significado físico de la magnitud en cuestión, ello, a través de su relación funcional con aquellos conceptos que intervienen en su metrización, dado que su introducción depende, al igual que en el resto de metrificaciones, de otras magnitudes fundamentales y/o derivadas ya conocidas, pero con la particularidad de que ellas deben ser *las inmediatamente anteriores en el proceso de derivación* (Sánchez, 2007, pág.51).

Asimismo, la dependencia que guarda la derivación en la metrización por definición, respecto de su contenido métrico operacional, viene dada, como ya quedó establecido, por el conjunto de conceptos métricos previos (magnitudes), así como de sus relaciones funcionales (representadas por leyes empíricas). Dentro de las últimas tenemos, por ejemplo, relaciones formales, que indican en qué ecuación es introducido el concepto nuevo –éstas expresan las correlaciones existentes con los valores ya conocidos– y, relaciones métricas, que indican por medio de qué magnitudes.

La pregunta que se hace Carmen Sánchez y que salta a la vista de forma inmediata es ¿cómo determinar que las magnitudes que intervienen en la metrización derivada por definición son las inmediatamente anteriores en el proceso de derivación? La respuesta está en la aplicación del análisis dimensional y el análisis magnitudinal. En la última sección explicaremos en qué consiste cada uno.

3.3. Definición del análisis magnitudinal para determinar el significado físico de una magnitud derivada (el cuanto de acción)

El análisis dimensional es un método utilizado por la física que cumple con distintas finalidades, entre ellas se encuentra la de analizar dimensionalmente las magnitudes. Para entender la naturaleza de este análisis es importante definir la noción de dimensión. Una dimensión se define como el número de coordenadas necesarias para especificar una magnitud. Una línea, por ejemplo, es unidimensional, es decir, tiene una dimensión, porque sólo es necesaria una coordenada para ser medida; un cubo, por su parte, necesita tres coordenadas para ser medido: su longitud, su profundidad y su altura. En el último ejemplo, la longitud, la profundidad y la altura proporcionan lo que se conoce como el volumen del

cubo. Notemos que, tanto la profundidad como la altura, se pueden entender como una distancia entre un punto y otro, es decir, como una longitud, por lo que el volumen resulta ser una magnitud derivada de la magnitud unidimensional de la longitud.

Así pues, el análisis magnitudinal consiste en la determinación de la cantidad de veces que aparece una magnitud fundamental, unidimensional, en una magnitud derivada. La forma en la que lo hace, *grosso modo*, consiste en clasificar las magnitudes que intervienen en una ecuación según clases dimensionales. Una clase dimensional es aquella que engloba a las magnitudes derivadas que se derivan de una magnitud unidimensional. En nuestro ejemplo anterior la clase dimensional es la longitud. Otro tipo de clases dimensionales son las de tiempo y espacio.

Partiendo de la idea de que el análisis magnitudinal consiste en contabilizar la cantidad de veces que una magnitud base interviene en la derivación de un concepto métrico derivado, pongamos, por ejemplo, la magnitud derivada de la velocidad (v), cuya ecuación es la siguiente:

$$v = \frac{d}{t}$$

En donde d es la distancia y t el tiempo. Recordemos que la distancia es una longitud y que, al igual que el tiempo, es una magnitud unidimensional, por tanto, es base o fundamental, por lo que la ecuación dimensional de la magnitud de la velocidad queda como sigue:

$$[v] = \frac{[L]}{[T]}$$

Los corchetes denotan que es una ecuación dimensional. Al aplicar las leyes aritméticas la ecuación dimensional queda de la siguiente forma:

$$[v] = LT^{-1}$$

Una de las características de las ecuaciones dimensionales consiste en que diferentes magnitudes derivadas pueden coincidir, es decir, contener las mismas magnitudes base a la misma potencia. Este hecho evidencia un problema en la interpretación de nuevas

magnitudes, y es que este método no distingue etapas de derivación, si bien nos ayuda a identificar cuáles son las magnitudes fundamentales que intervienen en la ecuación de una magnitud, no nos dice cuáles son los procesos de derivación para obtener el valor numérico de la magnitud en cuestión. Pongamos, por caso, a la energía cinética y el momento de una fuerza que comparten la misma ecuación dimensional, a saber: ML^2T^{-1} . La primera magnitud refiere a la energía que posee un cuerpo relativa a su movimiento y su ecuación es la siguiente:

$$Ec = \frac{mv^2}{2}$$

En donde m es masa y v es velocidad. La segunda, mide la tendencia de una fuerza a hacer girar un cuerpo alrededor de un punto, simbólicamente:

$$M = Fd$$

En donde F es fuerza y d es distancia. En el primer caso, interviene directamente la masa y la velocidad, esta última derivada del tiempo y la longitud, es decir, para calcular la energía cinética se dan dos pasos derivativos, primero se deriva la velocidad y, después, la energía cinética. El segundo caso, aunque posee la misma ecuación dimensional, contiene más pasos derivativos antes de poder llegar al momento de una fuerza, en tanto que, para derivar la Fuerza ($F = ma$), es necesario conocer la masa y la aceleración, es decir, para calcular el momento de una fuerza se dan tres pasos derivativos, primero se deriva la aceleración, después la fuerza y, finalmente, el momento de una fuerza.

Lo mismo sucede con otro tipo de magnitudes, entre ellas la magnitud de acción, ya que comparte ecuación dimensional con las magnitudes de momento angular orbital y momento angular intrínseco, esto es: $ML^2 T^{-1}$.

Como consecuencia de esto, el análisis dimensional resulta insuficiente para determinar el grado de derivación de una magnitud y, por ende, determinar si es o no introducida por medio de las magnitudes *inmediatamente anteriores*. Por esta razón, Carmen Sánchez propone el análisis magnitudinal, cuyo propósito es, justamente, el de distinguir entre clases

dimensionales por grado de derivación, así como distinguir la metrización derivada por definición del resto de metrificaciones, a partir de su reconstrucción métrica. El análisis magnitudinal se fundamenta en tres elementos:

1. Una norma de invariabilidad de las magnitudes base canónicas.
2. Un criterio de fundamentalidad métrica.
3. Dos reglas de derivación de magnitudes.

Dado que en el siguiente capítulo profundizaremos en la aplicación del análisis magnitudinal en relación con las Unidades Naturales de Max Planck, en esta sección no lo abordaremos más que para explicar la injerencia que tiene su uso en la presente investigación, para ello es preciso conocer los elementos estructurales que caracterizan una metrización derivada por definición.

La primera característica es la base magnitudinal de la que se derivan las metrificaciones por definición. La base debe estar constituida por magnitudes indefinidas, unidimensionales y dimensionalmente fundamentales, esto quiere decir que las dimensiones de las magnitudes base deben corresponder únicamente a una dimensión y a un concepto métrico indefinido; la segunda característica consiste en que las magnitudes establecidas como base, no pueden ser derivadas en el resto de la estructura métrica de la teoría que introduce la magnitud metrizada; la tercera, y más importante para la presente empresa, es la que garantiza la continuidad a lo largo de toda la estructura métrica por medio de las reglas de derivación del análisis magnitudinal, lo que quiere decir que la magnitud introducida debe estar correlacionada con los conceptos métricos base de menor a mayor grado de derivación.

Estos tres elementos en conjunto garantizan la interpretación en el sentido antes estipulado, por medio del cual es posible otorgar significado físico a la magnitud en cuestión. La tarea, pues, consiste en aplicar el análisis magnitudinal a la magnitud representativa de la física moderna, a saber, el cuanto de acción.

Finalmente, hay que acotar que, aunque en esencia el análisis magnitudinal está diseñado para determinar el grado de fundamentalidad métrica, en función de los pasos derivativos que conducen a determinada magnitud, siendo menos fundamentales las magnitudes con

mayor pasos derivativos, hay que hacer notar que su injerencia en nuestra investigación consiste en resaltar el proceso de derivación de la magnitud de cuanto de acción, con el fin de garantizar la continuidad por medio de la interrelación de los conceptos métricos de los que se deriva. En otras palabras, la aplicación del análisis dimensional y el análisis magnitudinal, al determinar las conexiones métrico-operacionales y representarlas en una estructura métrica en función de la cual se pueda seguir la generación del significado de la hipótesis cuántica, servirá para resolver el conflicto epistemológico que surge de la discontinuidad energética.

4. Conclusiones del capítulo

En conclusión, este capítulo mostró que el uso de factores probabilísticos y la introducción de la hipótesis cuántica desembocó en dos conflictos de naturaleza distinta. El primero de ellos, relativo a la noción de probabilidad, reveló que concebir al determinismo matemático como una característica del mundo empírico y, en consecuencia, de las leyes físicas que tratan de entender su comportamiento, llevó a la comunidad científica a no aceptar las implicaciones de la ley de Planck, particularmente, aquella que indicaba el carácter discontinuo de la cuantificación de energía. Se hizo patente, pues, que el determinismo matemático es una postura frente al tipo de conocimiento que se obtiene del mundo empírico, pero no se deduce de las leyes y principios de la física teórica, por lo que, aunque es un problema filosófico relevante, se muestra como un problema de tipo extrateórico, es decir, un problema que se escapa de los límites de la física teórica, esto es, de sus teorías, leyes y principios, así como de su estructura métrica, por medio de la cual se introducen y justifican nuevos conceptos métricos.

El segundo tipo de conflicto que trajo, particularmente, la hipótesis cuántica, es justo aquel que se vincula con la introducción y justificación de los conceptos métricos, en este caso, la magnitud de acción que pasó de ser cuantificada continuamente a discontinuamente. Como pudimos ver, la justificación de una magnitud o, en su defecto, su introducción injustificada, sí apela a la relación que la magnitud tiene con la ley que la introduce y la teoría de la cual forma parte, por lo que la ruptura de la ley de Planck respecto de las leyes clásicas debía ser abordada desde un enfoque métrico operacional.

Partiendo de esta idea, el capítulo mostró que darle un tratamiento métrico-operacional a la discontinuidad energética, en función del estudio que hace Carmen Sánchez de la fundamentalidad métrica de las teorías representativas de la física, entre las que se encuentran las trabajadas en esta investigación, permite establecer la continuidad por medio de la derivación e interrelación de los conceptos métricos que intervienen en la introducción del cuanto de acción. En ese sentido, demostrando el carácter derivado de la magnitud de acción estaríamos demostrando, en consecuencia, la continuidad en términos teóricos de la ley de Planck respecto de la física clásica.

El siguiente capítulo se ocupará, justamente, de mostrar el carácter derivado del cuanto de acción, por medio de la aplicación del análisis dimensional y magnitudinal, así como de mostrar el papel que juegan las magnitudes base de las que es derivable y que constituyen el sistema de Unidades Naturales de Max Planck.

Capítulo III: Continuidad métrica de la física teórica

1. Introducción

En el capítulo pasado hablábamos de la necesidad de derivar la magnitud de acción con el fin de garantizar la continuidad métrica de la física teórica, y de que una base magnitudinal fija serviría como fundamento epistémico de dicha continuidad. En este capítulo desarrollaremos ambas ideas. Concretamente, nos dedicaremos a exponer la derivación que lleva a cabo Carmen Sánchez de la magnitud de acción, en función de la constante de estructura fina α y las magnitudes base canónicas de masa, longitud y tiempo; para cumplir con este propósito es menester esclarecer en qué consiste el análisis magnitudinal propuesto por Sánchez, ya que, para derivar métricamente la magnitud del cuanto de acción h , se requiere implementar el análisis, de ahí que el primer punto a desarrollar sea la explicación de los pilares del análisis magnitudinal que son, a saber: un criterio de fundamentalidad métrica, una norma de invariabilidad de las magnitudes base canónicas y dos reglas de derivación de magnitudes. La comprensión del análisis magnitudinal nos permitirá aplicarlo a la magnitud de acción, para conseguir su derivación métrica lo que, a su vez, nos permitirá hablar sobre una posible continuidad métrica que haga patente la continuidad teórica dentro de la física. Recordemos que el conflicto que surgió a raíz de la hipótesis cuántica estaba en que no era posible derivar la magnitud de acción del complejo teórico de la física clásica, de tal suerte que la derivación de la magnitud de acción nos permitirá cerrar la brecha impuesta por la cuantificación de la energía, en el sentido de que proporcionará una relación entre la física clásica y la ley de Planck, aquella que dio origen al complejo teórico de la física cuántica.

En otras palabras, la importancia de este paso consiste en que la derivación de h nos permitirá entender la estructura métrica que caracteriza, no sólo a la magnitud de acción, sino, también, a las metrificaciones de la mecánica cuántica; la estructura métrica de la mecánica cuántica, a su vez, nos permitirá ver su relación con la estructura métrica de la mecánica clásica y el electromagnetismo clásico. Esta relación, cómo se verá en el desarrollo de esta sección, viene dada, principalmente, por una base magnitudinal invariable compuesta por las magnitudes de masa, longitud y tiempo.

La segunda parte de este capítulo partirá de la base magnitudinal relativa a la mecánica y electromagnetismo clásico y la mecánica cuántica en relación con el Sistema de Unidades Naturales de Max Planck, mostrando los elementos básicos que llevaron a Planck a formular un sistema de unidades partiendo de constantes universales; la intención de esta sección es argumentar a favor de la continuidad métrica de la física teórica, a partir de la relación que guardan las teorías físicas con la base magnitudinal canónica de masa, longitud y tiempo y el Sistema de Unidades Naturales de Planck. Finalmente, se hará uso de los conceptos de comunidad epistémica y sujeto epistémico, hallados en la obra de Luis Villoro, *Creer, saber, conocer* (1989), para delimitar tanto el alcance como los límites de las magnitudes base y el Sistema de Unidades de Planck como fundamento epistémico de la física teórica. Es decir, estas nociones nos servirán para delimitar el sentido en el que las magnitudes base y el Sistema de Unidades de Planck pueden ser consideradas como fundamento epistémico de la física teórica.

2. Análisis magnitudinal y derivación métrica de la magnitud de acción h

Para comprender cómo funciona el análisis magnitudinal, propuesto por Carmen Sánchez, y aplicarlo al cuanto de acción, empezaremos por desarrollar la noción de fundamentalidad métrica. La noción de fundamentalidad métrica parte del conjunto de magnitudes que constituyen la base de la cual se derivan o se introducen nuevos conceptos métricos, en ese sentido, la fundamentalidad refiere a magnitudes base que no dependen métricamente de otras.

La elección de estas magnitudes base viene dada por su carácter unidimensional y dimensionalmente fundamental, lo que significa que la magnitud corresponde únicamente a una dimensión y que, además, no es función de ninguna otra, lo que la vuelve una magnitud inderivable, esto es, un concepto métrico indefinido (recordemos que los conceptos métricos definidos son aquellos que se derivan métricamente de otras magnitudes, por lo que los indefinidos son lo que no se derivan métricamente). En otras palabras, se considerará como concepto métrico fundamental a la magnitud que no haya sido metrizada por medio de otros conceptos métricos, en consecuencia, la base magnitudinal deberá estar conformada por conceptos métricos en los que no haya un proceso de metrización por definición. |

Todas estas características, propias de las magnitudes base, componen el criterio de fundamentalidad métrica que Carmen Sánchez divide, concretamente, en una norma y una condición: La norma consiste en elegir n magnitudes base, tal que ninguna de ellas sea función de las otras. La condición, por su parte, radica en que la dimensionalidad de las magnitudes elegidas como base debe ser igual a la unidad, esto es, que no refiera a más de una magnitud, por lo que no puede haber una dependencia métrica a otra u otras magnitudes.

Este criterio de fundamentalidad métrica compuesto por la norma y la condición, nos dice la autora:

“[...] lo cumplen únicamente las magnitudes base canónicas [MLT] pues todo sistema generado en base a ellas cumple las normas del análisis dimensional en el proceso de la metrización derivada por definición de sus magnitudes” (Sánchez, 2007, pág. 87).

La base canónica de la que habla la cita refiere a las magnitudes de masa, longitud y tiempo, simbólicamente M, L y T, respectivamente. Sánchez defiende en su obra que el uso de estas magnitudes no corresponde a una arbitrariedad o convencionalidad, alegando su invariabilidad. Esta invariabilidad encuentra su justificación, principalmente, en dos argumentos. El primero de ellos descansa en que el uso de una base diferente a la compuesta por la masa, la longitud y el tiempo lleva a contradicciones, porque incumple la condición impuesta por el criterio de fundamentalidad métrica, en tanto que las magnitudes elegidas como base pertenecen, al mismo tiempo, al conjunto de magnitudes derivadas. El segundo argumento se encuentra en que, haciendo uso de la base de magnitudes [M, L y T], en conjunto con el análisis dimensional y el análisis magnitudinal, es posible determinar el grado de fundamentalidad métrica, es decir, partiendo de los conceptos métricos fundamentales de masa, longitud y tiempo es posible derivar cualquier concepto métrico, siempre y cuando este sea, por definición, derivable.

Este argumento se apoya del análisis específico que hace la autora cuando deriva las magnitudes representativas de la mecánica clásica, el electromagnetismo clásico y la mecánica cuántica, partiendo, precisamente, de esta base canónica. Este proceso, aunque es física y matemáticamente complejo –dada la cantidad de relaciones expresadas a través de leyes y de ecuaciones que intervienen en la metrización de todo el complejo de magnitudes

físicas– es, al mismo tiempo, metodológicamente sencillo, en el sentido de que es fácil comprender el grado de fundamentalidad de una magnitud derivada una vez aplicadas las reglas del análisis magnitudinal.

Como ya se resaltó en el capítulo anterior, esta investigación no tiene la intención de evidenciar la fundamentalidad o no fundamentalidad de la magnitud de acción, como sí es el propósito en la obra de Sánchez. Sin embargo, la aplicación del análisis magnitudinal, partiendo de la base de magnitudes de masa, longitud y tiempo, al igual que a nuestra autora, nos servirá para cumplir los propósitos de esta investigación, es decir, para evidenciar el proceso de derivación de la magnitud representativa de lo que hoy conocemos como mecánica cuántica, y usarlo como argumento a favor de la continuidad en sentido métrico de la física teórica.

Aclarado el punto anterior, podemos pasar a la exposición de las dos reglas del análisis magnitudinal, empezando por hablar de la utilidad de la primera regla, que sirve para distinguir las propiedades físicas derivadas de una base magnitudinal y el establecimiento entre proporciones fundamentales. Esta regla sólo aplica a las magnitudes fundamentales, aquellas que son unidimensionales y que, por tanto, no se derivan métricamente de otras magnitudes. Además, la regla nos recuerda que no todas las conceptualizaciones de propiedades físicas son metrificaciones por definición y que, en los casos en los que es aplicada, la dependencia métrica entre magnitudes base significa, lo que Sánchez llama, una *dependencia métrica no derivativa* (2007, pág. 90), que sucede en casos muy específicos en donde una magnitud fundamental es metrizada por medio de la propiedad física medible que comparte con otras magnitudes (Cf, Sánchez, 2007, pág. 90).

La segunda regla, por otro lado, trabaja con las magnitudes derivadas; éstas, nos dice la regla, son susceptibles de interpretación (en el sentido acotado en el capítulo anterior) si la magnitud *se encuentra metrizada por una magnitud de grado de derivación $n - 1$, pudiendo haber más magnitudes introductoras de menor grado* (Sánchez, 2007, pág. 91). Simbólicamente, esta regla se expresa de la siguiente forma:

$$M_n = \delta M_{n-1}$$

En donde M significa “magnitud”, n significa 1, 2, 3... y δ significa que la magnitud izquierda ha sido derivada métricamente de la magnitud que se encuentra después de la igualdad y que es, por *mor* de la regla, un grado más fundamental que la magnitud introducida. La aplicación de esta regla a la magnitud del cuanto de acción la hará más compresible, pero antes es necesario hacer algunas aclaraciones.

En primer lugar, hay que considerar que la cuantización de energía propuesta por Planck es $E = h\nu$, en donde ν (que es la frecuencia) es igual a $\frac{1}{T}$, siendo T el período y, por ende, es perfectamente legítimo trabajarla como un tiempo, quedando la ecuación que simboliza la constante de Planck como el producto de la energía por el tiempo:

$$h = ET$$

Carmen Sánchez nos dice al respecto:

“La acción es $S = ET$, donde E es la energía utilizada en el movimiento y T el tiempo empleado en realizarlo. Si el cuanto de acción representa la cantidad mínima de acción intercambiable entre sistemas en la naturaleza a nivel subatómico podemos suponer que en el cuanto de acción de Planck [...] su grado de derivación será el [...] grado cinco [...]” (2007, pág. 129).

Esta cita es importante, porque resalta dos cosas, la primera es la relación entre la magnitud de acción, que expresa la relación entre la energía y el tiempo, y el cuanto de acción de Planck, que es la magnitud que cuantifica la emisión de energía discontinuamente. Más adelante, cuando hablemos de la derivación del cuanto de acción, veremos la relación entre la magnitud de acción y el cuanto de acción. El segundo punto que hay que resaltar, es el grado de derivación del cuanto de acción, porque plasma la labor que se encargará de llevar a cabo la autora en el resto de su investigación y que constituye gran parte de su trabajo doctoral. Específicamente, Sánchez se encarga de derivar los grados 1, 2, 3 y 4, es decir, los grados que le preceden a la magnitud de cuanto de acción, de grado 5. Del mismo modo, es relevante, porque, desde entonces, podemos ver el carácter derivado de la magnitud del cuanto de acción de Planck, h , esto quiere decir que, al ser la constante de Planck una magnitud derivada de grado 5 su fundamentalidad métrica queda anulada, en tanto que las magnitudes fundamentales sólo son aquellas que no se derivan métricamente de otras

magnitudes. En otras palabras, su derivación significa que no forma parte de la base magnitudinal de la estructura de la mecánica cuántica, lo que, en consecuencia, indica que su significado físico es dependiente del significado de otra u otras magnitudes con las que se relaciona métricamente y de las cuales es derivable.

Aclarados los puntos anteriores, el siguiente paso en la presente investigación es mostrar, por medio del análisis magnitudinal que aplica Sánchez al cuanto de acción de Planck, cómo se lleva a cabo la metrización de h en función de las magnitudes de grado inferior, por medio de las cuales es derivable en sentido métrico.

2.1. Derivación métrica de la magnitud de acción

La no fundamentalidad del cuanto de acción, así como su carácter de magnitud derivada, descansan, según la demostración que lleva a cabo Sánchez, en primer lugar, en la relación que, originalmente, propone P.A.M Dirac (Dirac, 1997, pág. 7 en Sánchez, 2007, pág. 151) entre la constante de estructura fina (α)¹⁹, la carga del electrón (e)²⁰, la constante de la velocidad de la luz (c)²¹ y el cuanto de acción (h); simbólicamente, la expresión que las relaciona es la siguiente:

$$\alpha = \frac{e^2}{hc}$$

Al mismo tiempo, hay que considerar que la demostración parte de la metrización de h para un caso general, a saber, *la metrización de una magnitud de acción S en función de cargas eléctricas iguales y una velocidad v* (Sánchez, 2007, pág. 156), ya que, recordemos, el cuanto de acción h representa un valor constante de la magnitud de acción que es, a su vez, una derivada métrica de la magnitud de energía. Llevada a cabo esta metrización es posible pasar al caso particular para h , e y.

¹⁹ La constante de estructura alfa caracteriza la fuerza de la interacción electromagnética y posee un valor numérico independiente del sistema de unidades.

²⁰ La carga del electrón es una partícula subatómica con carga eléctrica elemental negativa.

²¹ La constante de la velocidad de la luz refiere a la velocidad de la luz en el vacío.

Por practicidad, empezaremos presentando el esquema arbóreo al que nuestra autora llegó, luego de aplicar el análisis dimensional y magnitudinal, después, nos ocuparemos de explicar cada ecuación y derivación de grado superior a la magnitud del cuanto de acción.

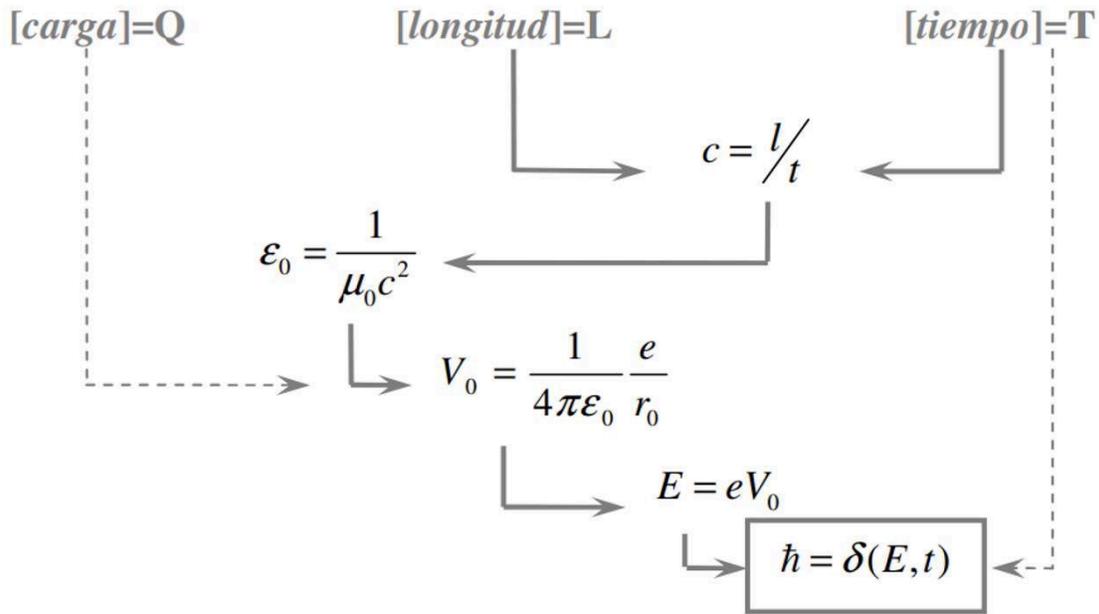


Figura 2

Esquema arbóreo de la derivación métrica de la magnitud de acción (Figura obtenida en Sánchez, 2007, pág. 159).

El esquema muestra, según las reglas de metrización derivada, las metrificaciones intermedias para el caso concreto de $\hbar = E, t$, éstas se encuentran representadas en grado descendente, es decir, de las más fundamentales a las menos fundamentales. A continuación, explicaremos las metrificaciones previas a la magnitud de acción de mayor a menor grado de fundamentalidad:

- Las magnitudes de grado 0, magnitudes fundamentales o base, corresponden a la carga (Q), a la longitud (L) y al tiempo (T).

De la longitud y el tiempo se deriva métricamente la constante de la velocidad de la luz (c) que resulta, por ello, ser una magnitud derivada de grado uno, simbólicamente:

$$[[c]] = M_1$$

- La metrización de segundo grado de derivación, descrita en el esquema, es la que corresponde a la constante ε_0 según la ecuación que relaciona la permeabilidad magnética del vacío (μ_0) y la velocidad de la luz (c):

$$\varepsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$$

- La metrización de tercer grado corresponde a la magnitud derivada de potencial eléctrico (v_0) que se deriva de la constante (ε_0) (de grado dos), de la carga eléctrica (magnitud fundamental de grado 0) y de r_0 que corresponde al radio clásico del electrón:

$$v_0 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{e}{r_0}$$

- Finalmente, tenemos la metrización de grado 4 correspondiente a una magnitud de energía (E) que depende de la carga eléctrica del electrón (e), así como de la magnitud de potencial eléctrico (v_0):

$$E = ev_0$$

De estas metrificaciones intermedias de grado 0, 1, 2, 3, y 4 se deriva métricamente h , siendo la magnitud que le precede la que corresponde a la magnitud de energía (E) de grado 4 y, al tiempo (T), que corresponde a una magnitud fundamental de grado 0.

Hasta aquí nuestra autora ha conseguido demostrar, según el análisis magnitudinal, que la magnitud de acción corresponde a una magnitud derivada, con lo que se cumple la primera parte de su propósito, a saber, derivar h para un caso general. Resta mostrar la relación métrica entre este caso y el caso particular que relaciona h , e y c con la constante de estructura fina alfa, que es la constante que caracteriza la fuerza de interacción electromagnética, para

lo que es necesario *pasar de la ecuación $h = e^2/\alpha c$ a una ecuación con la forma $h = \delta(E, t)$* (Sánchez, 2007, pág. 159).

Esto se debe a que es la última ecuación de la cita, $h = \delta(E, t)$, a la que se le han aplicado las reglas del análisis magnitudinal. Para llegar a la primera ecuación en cuestión, $h = e^2/\alpha c$, Carmen Sánchez comienza por relacionar la metrización de h con α considerando los siguientes puntos:

- i) Para el caso de las ondas electromagnéticas la velocidad de la luz (c) cumple:

$$c = \lambda v$$

En donde λ representa a la longitud de onda electromagnética y v su frecuencia.

- ii) La relación del radio clásico del electrón con la constante de estructura fina alfa según la relación:

$$r_0 = \alpha \frac{\lambda_0}{2\pi}$$

En donde λ_0 representa la longitud de onda de Compton para el electrón.

El siguiente paso es introducir λ_0 , despejándolo de la relación (ii), en la relación (i), en términos simples, hay que sustituir la longitud que resulta de (ii) en (i), quedando como sigue:

$$c = \frac{2\pi}{\alpha} r_0 v_0 \quad \text{(a)}$$

En donde v_0 representa la frecuencia para el caso específico de $c = \lambda_0 v_0$

Lo que sigue, para relacionar la metrización de h con α es sustituir (a) en la ecuación de la constante de estructura fina alfa, que es:

$$\alpha = e^2/hc$$

Haciendo el pertinente despeje obtenemos:

$$h = \frac{e^2}{\alpha c}$$

Luego sustituimos:

$$h = \frac{e^2}{\alpha} \cdot \frac{\alpha}{2\pi r_0 v_0}$$

Hacemos las eliminaciones correspondientes y obtenemos:

$$h = \frac{e^2}{2\pi r_0 v_0}$$

Hasta aquí la relación que se muestra corresponde a la metrización de h y α . En ella resalta, a su vez, la relación $\frac{e^2}{r_0}$ que corresponde a la energía potencial eléctrica, cuya ecuación es la siguiente:

$$E = \gamma \frac{e^2}{r_0}$$

En donde γ es un coeficiente relativista irrelevante. De ahí podemos decir que:

$$h = \frac{e^2}{2\pi r_0 v_0} = \frac{E}{2\pi v_0}$$

Esto nos conduce a la metrización de la energía $h = \frac{E}{v}$, propuesta por Planck, mediante la simplificación del factor 2π , con ello se consigue, *a partir de $\alpha = e^2/hc$, una metrización derivada por definición de la constante h de Planck aplicada al electrón, coherente con los análisis magnitudinal y dimensional* (Sánchez, 2007, pág. 160).

En la siguiente sección abordaremos las implicaciones que tiene este proceso (la derivación métrica de h) en la presente empresa.

2.2. Implicaciones epistemológicas de la derivación métrica de h

El recorrido histórico desarrollado en el primer capítulo mostró que la gestación y posterior justificación de la ley de Planck, para la radiación de cuerpo negro, introdujo en el complejo

teórico de la física una serie de inconsistencias respecto de las teorías clásicas. Hablamos de la incompatibilidad de la ley de Planck con las leyes simétricas y deterministas de Maxwell, del carácter estadístico de la hipótesis cuántica y del uso de la discretización de la energía. Sin embargo, una reevaluación de estos conflictos, llevada a cabo en el segundo capítulo, dejó ver que ni el indeterminismo ni el uso de la probabilidad atentan contra los cimientos de las teorías físicas, al menos no en un sentido métrico operacional, en tanto que la noción de determinismo no se deriva de las leyes y ecuación de la física teórica, y que, más bien, ésta surge del dogmatismo científico caracterizado por una forma específica de ver el mundo físico.

Fue claro, entonces, que el problema que entraña el uso de la hipótesis cuántica se encuentra en las implicaciones que surgen de la forma en la que se cuantifican los fenómenos físicos, así como en la legitimidad de la introducción del cuanto de acción como magnitud física y no como un mero recurso matemático. En otras palabras, el conflicto que provocó la introducción de la hipótesis cuántica estaba en que la magnitud que introducía la cuantificación de la energía, el cuanto de acción, no era derivable de las teorías físicas precedentes. De tal suerte que, partiendo de la idea de que la derivación de una magnitud se da en función de su relacionalidad métrica, por medio de otras magnitudes, la magnitud de acción no era una magnitud derivable.

Más, esta investigación ha mostrado que, por medio del análisis magnitudinal, es posible interpretar la magnitud de acción, en el sentido de que es posible derivar la magnitud de acción por medio de otras magnitudes, razón por la cual es en relación con su significado físico (su contenido métrico operacional) que las consecuencias inmediatas de la derivación métrica de h , llevada a cabo recientemente, serán planteadas a continuación.

Las implicaciones de la derivación de h desembocan en varios puertos, Carmen Sánchez, por ejemplo, organiza grupos según su grado de derivación, con lo que consigue construir la estructura métrica de la mecánica cuántica haciendo uso del factor alfa, pues, según la derivación de h , este se encuentra contenido en la constante h de Planck y, ya que h forma parte de una gran cantidad de metrificaciones en el mundo atómico, le es posible derivar cada magnitud en función de la constante de estructura fina alfa (α).

De entre todas las funciones que puede tener esta reconstrucción, lo que nos interesa hacer notar son los siguientes puntos:

- La reconstrucción parte de una base magnitudinal representada por la base canónica de masa, longitud y tiempo.
- Las magnitudes base no aparecen derivadas en el resto de la estructura métrica.
- La derivación de cada magnitud es continua, es decir, que en la estructura métrica de la mecánica cuántica hay una interrelación métrica entre cada una de las magnitudes derivadas que la componen, de modo que cada metrización parte de las magnitudes base y llega a las magnitudes de mayor grado de derivación en orden descendente, de las más fundamentales a las menos fundamentales, sin obviar o saltar metrificaciones (Cf., Sánchez, 2007pág. 178).

Estos tres puntos nos hablan, en primer lugar, de que a la base de la estructura métrica de la mecánica cuántica se encuentra una base magnitudinal invariable que permite derivar las magnitudes que componen las teorías cuánticas y que, siguiendo el proceso de derivación del análisis magnitudinal, la inderivabilidad de la magnitud de acción deja de ser problemática, al quedar sentado que su derivabilidad está garantizada por dicho análisis y por la base magnitudinal canónica de masa, longitud y tiempo.

Por otro lado, estas características corresponden, de igual forma, a la estructura métrica de la mecánica clásica (Cf., Sánchez, 2007, pág. 111) y a la estructura métrica del electromagnetismo (Cf., Sánchez, 2007, pág. 122), ambas, como vimos en el capítulo primero, significaron un papel importante en los inicios de la física moderna, pero, también, jugaron un rol en su posterior desarrollo, además de que constituyen dos de los campos más representativos de la física teórica.

Que la mecánica clásica, el electromagnetismo clásico y la mecánica cuántica partan de una base magnitudinal idéntica, que sus magnitudes base no sean derivables en el resto de la estructura métrica y que la derivación de todas sus magnitudes sea continua, indica que cuentan con una estructura métricamente coherente, lo que significa que la fundamentalidad métrica de las teorías físicas está garantizada por una base magnitudinal canónica e invariable que, a su vez, esclarece la relación que hay entre las teorías de la física clásica y las de la

física moderna, pues muestra que la continuidad en sentido métrico de la física teórica viene dada, como se mencionó, por el uso de una base magnitudinal compuesta por la masa, la longitud y el tiempo, así como por la aplicación del análisis magnitudinal.

Esta continuidad en sentido métrico de la que hablamos surge de considerar que una teoría cuantitativa es, necesariamente, una teoría con funciones métricas que trabaja con objetos físicos calculables, cuyas regularidades empíricas permiten ser tratadas por medio de estructuras métricas que admiten que nuevas magnitudes sean introducidas a través de su relación con otros conceptos métricos, en donde buena parte de su estudio viene dado por el establecimiento de correlaciones en las que se emplean leyes que previamente han sido investigadas y justificadas empíricamente.

Ahora bien, es claro que el uso de conceptos cuantitativos, magnitudes, no es requisito suficiente para el desarrollo de nuevas leyes y teorías, lo que indica que los elementos que componen la estructura métrica operacional, de la que parten todas estas conclusiones, no alcanzan para describir o definir a la física teórica, ya que, indiscutiblemente, una teoría física es mucho más que sus elementos cuantitativos, aquellos de los que hemos tratado de ocuparnos previamente. Entre estos elementos podríamos destacar factores sociales, como la injerencia de comunidades científicas o intervalos históricos, y factores prácticos, como la contrastación de hipótesis o el campo de aplicación de las teorías.

Es importante resaltar lo anterior, ya que en ello descansa el hecho de que la intención de esta investigación no sea postular un tipo de ciencia continuista que elimine factores sociales o humanos, como errores en los cálculos o en la interpretación de éstos. La intención no es defender que la física teórica es un cúmulo de conocimientos acumulativos y progresistas. Lo que se ha tratado de mostrar, a lo largo de este recorrido, es un modo particular en el que se relaciona entre sí el conocimiento generado por las teorías físicas, relación que se fundamenta en una base magnitudinal y en un sistema de derivación sobre el que descansa y se justifica la introducción de nuevas magnitudes.

Así pues, la continuidad postulada en esta investigación es una continuidad métrica que se identifica con los *elementos teóricos mínimos* que hacen posible el estudio de la realidad física y que, al ser usados por el complejo de la física teórica, como lo demuestra el análisis

magnitudinal, pueden ser llamados fundamentales al ser inherentes a cada teoría, por distintas que éstas parezcan.

Este tipo de continuidad que evidencia un tipo de relación específica entre las leyes de la física teórica surge del hecho de que la estructura métrica de la mecánica clásica, el electromagnetismo clásico y la física cuántica compartan una base magnitudinal y de que todas las magnitudes introducidas por definición sean derivables de esa base, incluida la magnitud de acción. Este hecho nos permite, finalmente, hablar de un sistema de unidades naturales, compuesto por el conjunto de magnitudes base, que pueda ser considerado como fundamento epistémico, más allá de uno meramente métrico, de la continuidad teórica de la física, por lo que, en la siguiente sección, nos ocuparemos de desarrollar esta idea.

3. Fundamentalidad epistémica de las Unidades Naturales de Max Planck

El primer paso para sentar las bases de una fundamentalidad epistémica, es decir, una base operativa que regule la cuantificación y la conceptualización de propiedades físicas, basada en un sistema de unidades naturales es esclarecer en qué consiste este último. Un sistema de unidades naturales de medida es usado en física como una herramienta metodológica, en función de la cual las constantes universales de la naturaleza se relacionan, además de que simplifica muchas de las ecuaciones que se emplean para trabajar ciertos fenómenos físicos. Su función, en primera instancia, es hacer uso de las constantes fundamentales como punto de apoyo en la definición de un sistema de unidades invariable y perdurable en el tiempo y en el espacio. Más adelante trabajaremos con un ejemplo concreto relativo al sistema de unidades propuesto por Planck, pero, de forma simple, un sistema de este tipo se compone de los siguientes pasos:

- Se toman como unidades de medida constantes universales.
- Se asigna a cada constante un valor unidad.
- Se determina en función de ellas el resto de las magnitudes físicas.

En el caso particular del Sistema Natural de Unidades de Medida de Planck se asigna un valor unidad a cinco constantes fundamentales y, en función de ellas, se derivan cinco magnitudes fundamentales de la naturaleza, en el sentido de que son determinantes para cuantificar y conceptualizar fenómenos del mundo empírico, éstas son las siguientes:

1. Tiempo de Planck, simbólicamente (t_p)
2. Longitud de Planck, simbólicamente (l_p)
3. Masa de Planck, simbólicamente (m_p)
4. Carga de Planck, simbólicamente (q_p)
5. Temperatura de Planck, simbólicamente (T_p)

En la siguiente sección nos ocuparemos de explicar el proceso de derivación que llevó a cabo Planck para definir este conjunto de unidades, lo que evidenciará su importancia para esta investigación.

3.1. Definición y significado del conjunto de Unidades Naturales de Max Planck

Con el fin de tener lo más claro posible el significado de las Unidades Naturales de Planck, en función de la comprensión del tratamiento que le diera su autor a las constantes universales de las que partió y los valores que obtuvo de las magnitudes base canónicas, es preciso considerar ciertos factores, si se quiere obvios, que fungen un papel en la cuantificación y conceptualización de propiedades físicas. Los factores de los que hablamos ya fueron mencionados en secciones previas de forma directa o indirecta, particularmente en el capítulo dos, por lo que sólo nos ocuparemos de resaltar ciertas características que nos interesan para avanzar en la investigación.

Lo primero que hay que traer a colación es que el uso de conceptos métricos, magnitudes, exige no sólo una técnica de medición a través de la cual sea posible comparar una magnitud con otra de la misma especie, un ejemplo de ello podría ser una regla de madera graduada para medir una distancia que va de un punto A a un punto B . Al mismo tiempo, el uso de magnitudes exige un patrón de medida o unidad de medida, cuyo valor sea establecido y perfectamente definido, para emplearlo como referencia con el fin de medir y expresar otras magnitudes de la misma especie. Este patrón de medida, regularmente, es establecido mediante un consenso. Pongamos, por ejemplo, el caso particular del tiempo, cuya unidad de medida es el segundo, luego pensemos en la forma en que lo utilizamos; notemos que constituimos los minutos a partir de segundos y las horas a partir de minutos: sesenta

segundos constituyen un minuto y sesenta minutos una hora, esto quiere decir que medimos el tiempo que tardamos en recorrer una distancia o en realizar una actividad en función de un patrón de medida específico que ha sido determinado mediante un consenso. Sin embargo, esto no quiere decir que el patrón no pueda ser otro, uno en el que el minuto estuviera constituido por treinta segundos y la hora por ciento veinte minutos. Lo mismo pasa con el resto de las unidades de medida. Asimismo, cada una de las mediciones relativas a las propiedades físicas arroja un valor numérico que está en función de la técnica de medición que se emplea y las unidades con que se mide.

En contraste, hay valores numéricos constantes que, bajo las mismas condiciones, nos arrojan los mismos resultados, se trata de las constantes fundamentales. En un artículo publicado por la Revista Mexicana de Física, (Martínez, 2011), se menciona que, aunque no hay una definición formal del término, las constantes fundamentales tienen como característica que sus valores son invariantes en el tiempo y en el espacio, esta suposición se fundamenta en la realización de experimentos cada vez más precisos, lo que otorga un menor grado de incertidumbre. También, se señala en el artículo que es posible clasificarlas en cuatro grandes grupos: Universales, electromagnéticas, atómicas y nucleares y físico-químicas. Respecto a las primeras, que son de las que nos interesa ocuparnos aquí, Ulises Moulines menciona, en la obra *Fundamentos de filosofía de la ciencia* (1997) que las constantes universales son:

“[...] valores numéricos que intervienen en ciertas leyes naturales, pero, a diferencia de otras mal llamadas también constantes, no dependen de ningún cuerpo material. No son valores que correspondan a ninguna magnitud y por tanto, aunque se determina su valor numérico, no se miden en el sentido estricto del término. Es cierto que tienen dimensiones, y por ello, en función de qué escalas usemos para las magnitudes de las dimensiones, el coeficiente numérico de estas constantes puede variar [...]. Pero esas dimensiones no corresponden a ninguna magnitud, son simplemente producto de exigir la coherencia dimensional a las leyes en que aparecen” (pág. 215).

La constante de la velocidad de la luz y la constante gravitacional, entre otras, forman parte del selecto grupo de constantes universales, todas ellas poseen un valor numérico que, como lo indica la cita, viene acompañado de un coeficiente que puede ser expresado en diversas escalas de acuerdo con el sistema de unidades en el que son usadas. La velocidad de la luz

en el vacío, por ejemplo, es una cifra fija, porque estipula que la luz viaja a una velocidad constante en el vacío, su valor numérico puede ser expresado en metros sobre segundos, 299.792,458 m. /s., o en kilómetros sobre horas, 1, 080, 000,000 km/h, esto es, simplemente, una conversión de unidades de un sistema a otro que depende de la escala en la que es usada la constante.

Que su valor numérico cambie dependiendo la escala no quiere decir que las constantes sean menos universales, pues su valor no está dado por un cuerpo material específico, por ejemplo, la constante gravitacional tiene lugar al notar que el producto de la masa de dos cuerpos, entre la distancia que los separa al cuadrado, siempre será la misma independientemente de los valores de la masa y la distancia, pero, de la misma forma que sucede con la velocidad de la luz, el valor numérico que surge de esta relación debe ser expresado según la escala en que esté graduado el instrumento de medición.

Dado su valor constante y su relación con las leyes formuladas por la física²², Planck consideró que, por medio de las constantes universales encontradas en la naturaleza, incluidas las ya mencionadas, era posible calcular unidades de medida que escaparan al beneplácito del hombre. Planck expresó al respecto lo siguiente:

“Con la ayuda de constantes fundamentales tenemos la posibilidad de establecer unidades de longitud, tiempo, masa y temperatura que necesariamente mantengan su importancia en todas las culturas” (Ann. Physik 1, 69-122 (1900) en Ocaña, (diciembre 2020). *La Constante de Planck*. Revista Española de Metrología: e-medida. Recuperado el 20 de enero del 2022 de <https://www.e-medida.es/numero17/la-constante-de-planck/>).

Obviamente, la importancia que atribuye Planck a un sistema de unidades establecido a partir de constantes universales surge de la importancia de las segundas, ya sea por su relación con el conjunto de leyes físicas o por su carácter de universalidad y no, precisamente, al grado de fundamentalidad métrica de las primeras, pues, aunque las magnitudes de longitud, masa y

²² En el artículo antes mencionado encontramos, por ejemplo, que *la constante de gravitación universal de Newton G aparece justamente como aquella constante que hace falta para modelar matemáticamente la forma en que la fuerza de gravedad actúa entre dos cuerpos de masa m_1 y m_2 separados por una distancia r . La velocidad de la luz c aparece de manera natural en la teoría especial y general de la relatividad. La constante de Planck h en la mecánica cuántica* (Martínez, 2011, pág. 464).

tiempo son consideradas como magnitudes fundamentales, o base, en las leyes de la mecánica clásica, parecía no ser del todo claro que lo fueran para el resto de leyes físicas en las que intervenían procesos más sofisticados de medición. Sin embargo, dado que el análisis magnitudinal de Carmen Sánchez ha mostrado que una base magnitudinal compuesta por estas tres magnitudes es invariable y canónica, parece justo ir más allá de su visión, para lo cual hay que esclarecer antes la metodología de Planck.

De forma concreta, lo que hizo el físico fue buscar unidades de medida que fueran igual a la unidad, es decir, que arrojaran como valor numérico 1 sin unidades de medida que las acompañaran. De forma intuitiva, la cuestión radicaba en saber, por poner un caso, cuánto habría que medir la unidad de medida de tiempo y de espacio, para que el tiempo que tardara en recorrer la luz una distancia fuera igual a uno. El siguiente ejemplo servirá para aclarar este punto.

Primero supongamos lo siguiente:

1. Existe una regla que de un punto a otro mide 300, 000,000 m. y que esto equivale a una unidad dentro de la regla.
2. Que tenemos un reloj que marca los segundos igual que los relojes usuales.

Al mismo tiempo, consideremos:

3. Que el valor de la constante de la velocidad de la luz en el vacío (c) es de 300 000,000 m/s

Lo que obtenemos es que el tiempo que tarda la luz en recorrer la distancia entre un punto y otro de la regla es igual a 1 en función de la fórmula que indica que la velocidad de la luz (c) es proporcional al producto de la distancia (d) sobre el tiempo (t), simbólicamente:

$$c = \frac{d}{t}$$

Sustituyendo los datos obtenemos:

$$c = \frac{1}{1} = 1$$

En donde el primer 1 equivale a la unidad de distancia entre un punto y el siguiente de la regla y, el segundo, a la unidad de tiempo transcurrido entre un punto y otro de la regla. Si esto lo llevamos al Sistema de Unidades de Planck lo que obtendríamos sería la siguiente expresión:

$$t_p = \frac{300000000}{l_p}$$

Este resultado significa que la luz recorre una sola vez la longitud de Planck (l_p) en lo que dura una unidad de tiempo de Planck (t_p). El problema con esto es que claramente sólo funciona para la constante de la velocidad de la luz y el propósito de un sistema de unidades, en este caso el de Planck, es que todas las constantes físicas fundamentales deben de ser equivalentes a uno, por lo que es necesario hacer lo mismo con la constante de gravitación, la constante de Planck, la constante de fuerza de Coulomb y la constante de Boltzmann. La unicidad de estas constantes, como lo menciona Sánchez, reafirma su fundamentalidad y permite obtener valores numéricos para las magnitudes que componen la base magnitudinal de la mecánica y electromagnetismo clásico, así como de la mecánica cuántica, ya que, por medio del análisis magnitudinal, es posible *derivar de estas cinco constantes, cinco magnitudes consideradas fundamentales en la naturaleza* (Sánchez, 2007, pág. 194).

Entrando en materia, la reducción de cada una de las cinco constantes universales, mencionadas previamente, a un valor unidad le permitió a Planck estipular un patrón de medida compuesto por las magnitudes representativas de la física teórica. Sin embargo, hay que resaltar que, aunque la reducción a un valor unidad fue aplicada a cinco constantes universales, la realidad es que, para definir el tiempo de Planck, la masa de Planck y la longitud de Planck, sólo es necesario hacer uso de la constante de la velocidad de la luz, la constante gravitacional y la constante de Planck. El resto de las constantes se requieren para definir la carga y la temperatura de Planck, que son magnitudes que no forman parte de la base magnitudinal canónica e invariable subyacente a la estructura métrica de la física, razón por la cual dejaremos su exposición de lado.

Cabe aquí hacer algunos comentarios respecto a la exposición que se llevará a cabo del sistema de ecuaciones de Planck. En primer lugar, hay que decir que su formulación parte de

un amplio dominio del uso del análisis dimensional y el empleo de despejes de fórmulas, con la intención de aislar la incógnita del resto de los términos, para hallar el valor de las magnitudes base. Si bien este procedimiento no es de suyo complicado, si nos llevaría a un planteamiento sumamente largo e innecesario, ya que la intención es mostrar la relación que hay entre las constantes universales y las magnitudes base canónicas de la física dentro del Sistema de Unidades Naturales de Planck, y no la comprobación o reformulación de ellas, esto último es trabajo de los físicos, no de los filósofos. De ahí que no nos adentraremos en el procedimiento de derivación y justificación matemática, sino que nos centraremos, únicamente, en resaltar la relación entre el tiempo de Planck, la longitud de Planck y la masa de Planck respecto de la constante de Planck, la constante de gravitación y la constante de la velocidad de la luz. Dicho lo anterior, podemos pasar a la definición de las tres magnitudes que nos importan.

La definición de las magnitudes base, dentro del Sistema de Unidades de Planck, se obtiene haciendo uso del análisis dimensional que parte de las dimensiones de las tres constantes universales mencionadas previamente, y cuyas dimensiones son las que siguen:

- Constante de Planck: h (ML^2T^{-1})
- Constante de gravitación: G ($M^{-1}L^3T^{-2}$)
- Constante de la velocidad de la luz en el vacío: c (LT^{-1}).

Como el lector puede ver, las dimensiones de las tres constantes universales en cuestión están definidas en función de la masa, la longitud y tiempo, elevadas a diferentes potencias, de ellas se plantea un sistema de ecuaciones que corresponde a las unidades de masa, longitud y tiempo, su representación simbólica es la siguiente:

El tiempo de Planck se representa como:

$$t_p = \sqrt{\frac{hG}{c^5}}$$

La longitud de Planck se representa como:

$$l_p = \sqrt{\frac{hG}{c^3}}$$

La masa de Planck se representa como:

$$m_p = \sqrt{\frac{hc}{G}}$$

Como podemos ver, el valor agregado que tienen las unidades naturales de Planck, sobre las unidades convencionales, está en la relación que guardan con las constantes físicas de orden universal. Carmen Sánchez lo expresa de la siguiente forma:

“Es razonable suponer que los cinco valores constantes de estas magnitudes, al ser obtenidos de constantes universales, pueden representar o referirse a propiedades físicas significativas de la naturaleza: propiedades que permanecen constantes dentro de la estructura física de determinados fenómenos” (Sánchez, 2007, pág. 194).

Notemos que cuando Carmen Sánchez alude a propiedades físicas *significativas* que permanecen constantes se está refiriendo a que su valor es fijo e invariable al ser derivado, directamente, de constantes universales, lo que hace que aquellas se preserven en el tiempo y en el espacio de la misma forma que éstas.

Esto nos lleva a una cuestión de suyo importante y es que, parece obvio que la pregunta que surge es si estas propiedades físicas significativas de la naturaleza lo son, porque refieren a los elementos que constituyen a los objetos físicos o, si lo son, sólo en virtud del aparato operativo conceptual de la física, pues permanece abierta la acotación que hace hacia el final de la cita: *dentro de la estructura física de determinados fenómenos*. A su vez, entender en qué sentido son significativas las propiedades físicas a las que refieren las constantes universales nos hará entender el valor o el significado del Sistema de Unidades de Max Planck, en tanto que este se deriva de aquellas.

Así pues, para responder a la pregunta anterior, es necesario entender en qué sentido es significativo el Sistema de Unidades de Planck. Una forma de entender su significado es a partir de su alcance y sus límites, es decir, a partir de su rango de aplicación, por lo que esta

cuestión será analizada en el siguiente apartado, propiamente en función de los conceptos de sujeto epistémico y comunidad epistémica que trabaja Luis Villoro en su obra *Creer, saber y conocer* (1989).

3.2. Connotación epistémica de las Unidades Naturales de Max Planck: su alcance y límite en relación con el conocimiento generado por la física teórica

Para entender el alcance y los límites del Sistema de Unidades Naturales de Planck es preciso tener siempre en mente que los elementos de los que se desprende el sistema son una base magnitudinal específica (masa, longitud y tiempo) y un conjunto de constantes universales (la constante de Planck, la constante de gravitación y la constante de la velocidad de la luz). Las características tanto de las primeras, como de las segundas definen al Sistema de Unidades de Planck.

Ahora bien, el valor adscrito de las magnitudes base o fundamentales se vincula con el aparato conceptual por medio del cual fueron introducidas en primer lugar, es decir, se vincula con la forma en la que se cuantificaron y conceptualizaron. Por su parte, el valor de las constantes físicas está supeditado no sólo a descubrimientos de fenómenos físicos posteriores sino, también, a los aparatos de medida que hagan posible el acceso a fenómenos físicos que hasta ahora son desconocidos o inaccesibles y que, de alguna forma, sigan confirmando el valor de las constantes universales.

El valor de las magnitudes, dependiente del aparato conceptual, y el valor de las constantes, supeditado a nuevos descubrimientos, apuntan a la situación del conocimiento que genera la física teórica. Esta situación la podemos entender a partir de los conceptos de sujeto epistémico y comunidad epistémica de los que nos habla Villoro.

El primer concepto Villoro lo entiende como todo sujeto al que le sean accesibles las mismas razones que le son accesibles a un sujeto S que sostenga un juicio, en otras palabras, cualquier sujeto capaz de aprender un objeto y entender las razones que llevan a S a sostener un juicio acerca de él. Pongamos por caso el siguiente juicio: “la tierra se mueve”, para poder sostener que de hecho la Tierra se mueve es necesario tener acceso a las leyes mecánicas del universo, entender su fundamento y su relación con otros hechos o datos empíricos que lo corroboren, como pudiera ser la sucesión del día a la noche y las estaciones del año. Obviamente, los

enunciados de la física teórica, entendiéndolos como las leyes que conforman una teoría, requieren de un conjunto de razones accesibles en demasía amplio, debido a su complejidad, que se vinculan con el complejo teórico, con la matematización del fenómeno físico, y con la relación de concordancia entre una ley y su correlato empírico. En el caso de la ley de Planck, por ejemplo, el complejo teórico del que se deriva descansa en la ley de Kirchhoff, en la teoría electromagnética de Maxwell y en la noción de probabilidad y entropía de Boltzmann; por su parte, el conjunto de razones accesibles en relación con la matematización, apela a la discretización de la energía; y, finalmente, el conjunto de razones accesibles que atienden a la relación entre la ley y el hecho empírico descansa en la coincidencia entre la ley y los resultados experimentales, es decir, entre la cuantificación discontinua del fenómeno de la emisión de energía y el modelo de cuerpo negro que se inventó para trabajar con temperaturas altas.

Respecto a la comunidad epistémica, Villoro la entiende como el conjunto de sujetos que forma parte de una comunidad determinada, constituida por todos los sujetos epistémicos posibles que tengan acceso a las mismas razones. En el caso de la ley de Planck, la comunidad epistémica estaría formada por todos los sujetos que tengan una formación en física teórica que les permita comprender el aparato métrico conceptual del que se desprende el complejo de magnitudes con las que trabaja la física teórica, así como un sistema de órganos e instrumentos que les permitan corroborar que de hecho hay una concordancia entre la ley de Planck y la emisión de energía.

Antes de continuar hay que decir que las comunidades epistémicas y los sujetos epistémicos no son exclusivos de la ciencia y que el conjunto de razones accesibles no puede ser del mismo tipo que las razones accesibles de la física teórica. Por ejemplo, puede haber comunidades epistémicas religiosas, por poner un caso, cuyos sujetos epistémicos sostengan la existencia de alguna deidad y, cuyas razones, se centren en eventos específicos, como milagros o experiencias místicas a las que los sujetos epistémicos tengan acceso. De ahí que, para el autor, todo sujeto epistémico esté en relación o se encuentre dentro de una comunidad epistémica a la que le sean accesibles las mismas razones, para sostener un juicio en relación a un objeto dado.

Ahora bien, para comprender de que tipo son las razones accesibles del sujeto epistémico y la comunidad epistémica relativas a la física teórica, antes bien hay que entender que la accesibilidad está enmarcada social e históricamente, pues depende de datos experimentales y teóricos, medios técnicos, como tecnologías específicas, e información acumulada que surge de teorías o interpretaciones, por lo que el acceso a las razones de un sujeto está determinado por el conocimiento de la época, es decir, por su desarrollo, por sus mejoras, por la precisión de los instrumentos, etc.

Así mismo, la accesibilidad, también está supeditada a un marco conceptual común a todo sujeto epistémico empleado para referirse a un hecho y decir algo sobre él, en el caso de la física teórica el marco conceptual está determinado no solo por conceptos métricos sino, también, por un lenguaje matemático por medio del cual se representan los fenómenos físicos.

Para entender lo anterior, regresemos a la relación entre las magnitudes base o fundamentales de masa, longitud y tiempo y las constantes universales de las que se deriva el Sistema de Unidades de Max Planck. Como vimos en el segundo y tercer capítulo de la investigación, el uso de conceptos métricos depende del aparato conceptual de la física teórica, es decir, depende de la forma en la que se cuantifican y conceptualizan los fenómenos físicos. El aparato conceptual de la física teórica es, en principio, un aparato común a todo sujeto epistémico que proporciona un marco de referencia que permite identificar las relaciones entre ciertos fenómenos físicos, así como cuantificar hechos empíricos, corroborar hipótesis y poner a prueba leyes físicas.

El aparato conceptual que utilizamos para aprehender las regularidades de ciertos fenómenos físicos, aquellos susceptibles de cuantificación, ha servido para expresar en términos métricos información sobre los objetos que arroja valores y relaciones que preservan su valor en diferentes ámbitos del campo de estudio de la física, lo que hace que la cuantificación y la conceptualización de propiedades físicas sea útil en la ciencia y en la tecnología, ello, como efecto de la congruencia entre teoría y datos empíricos. Estos resultados dependen, en gran medida, de nuestras definiciones y muestran a que se refiere Villoro cuando habla sobre la necesidad de un marco conceptual común a todo sujeto epistémico que posibilite la

enunciación de juicios relativos a las propiedades de un objeto, en este caso, el objeto de la física teórica.

Por su parte, la accesibilidad histórica de la que habla Villoro se entiende en relación con las limitaciones que residen en la validez de los datos experimentales, ya que éstos son válidos sólo para regiones del universo conocido, y no es difícil suponer que existan variaciones en ciertas regiones a las que no hemos tenido acceso por medio de recursos experimentales, lo que quiere decir que, al menos hasta este punto de la historia, el alcance y los límites de las Unidades de Planck se encuentran restringidas al conocimiento alcanzado por la época. De igual forma, debemos considerar que este carácter histórico nos conduce a pensar que los métodos experimentales de la física, tal como fueron ejemplificados, y que corresponden a la naturaleza inacabada de la ciencia y a la insuficiencia de datos experimentales obtenidos hasta ahora, no sean suficientes para garantizar la universalidad de las constantes físicas, en tanto que su valor de universalidad corresponde únicamente al universo conocido.

Llegados a este punto, podemos regresar a la cuestión que dio origen a este apartado. Recordemos que la pregunta giraba en torno al significado de la Unidades Naturales de Max Planck. Dijimos que su significado podía ser entendido en relación con su alcance y sus límites. Ahora bien, las nociones de sujeto epistémico y comunidad epistémica muestran que tanto las magnitudes base como las constantes universales (de las que se deriva el Sistema de Unidades de Planck) están restringidas al aparato conceptual de la física teórica, por medio del cual se cuantifica y conceptualiza propiedades físicas, así como a su carácter histórico determinado por las teorías vigentes y los instrumentos de medida, por medio de los cuales se accede al entramado de fenómenos físicos.

Asimismo, como resultado de lo anterior, el alcance y los límites del Sistema de Unidades Naturales de Max Planck están dados por su justificación matemática, así como por la relación que guardan las constantes universales con las leyes y teorías físicas. La justificación, a su vez, está supeditada a los datos experimentales y a los modelos de la física que otorgan un marco de referencia que permite cuantificar y conceptualizar la constante de Planck, la constante de gravitación y la constante de la velocidad de la luz.

En ese sentido, el rango de aplicación del Sistema de Unidades Naturales de Planck no sólo es dependiente de su corroboración empírica, sino que también es dependiente de la dimensión subjetiva que involucra la forma en la que el hombre cuantifica y conceptualiza propiedades físicas. Esta subjetividad de la que hablamos no apela a una relativización de la cuantificación y conceptualización de propiedades, sólo indica que, en última instancia, son los seres humanos los que han desarrollado el complejo de leyes físicas que han dado origen a un conjunto de teorías que se corresponden con los datos y hechos empíricos y que, por ello, su marco conceptual es dependiente de la forma en la que acceden al entramado de leyes físicas.

Siguiendo esa directriz, el significado de las Unidades de Planck nos conduce, en primera instancia, a pensar en ellas como fundamento epistémico del proceso de metrización por dos razones: la primera es porque fueron formuladas, justificadas y corroboradas por sujetos epistémicos, dentro de una comunidad epistémica que consideró, no sólo un marco conceptual específico y accesible a cualquier otro sujeto sino que, también, fueron formuladas haciendo uso de constantes universales que guardan una relación con leyes físicas que, de igual forma, se desarrollaron bajo los mismos supuestos, esto es, sujetos y comunidades epistémicas. En segundo lugar, la relación que guarda el Sistema de Unidades Naturales de Planck con las magnitudes base, que constituyen la estructura métrica de la física, nos permite hablar de ellas como fundamento epistémico en el sentido de que, al igual que las magnitudes base, son determinantes en la cuantificación y conceptualización de propiedades físicas. En otras palabras, el carácter epistémico del significado de las Unidades Naturales de Planck está demarcado por su dependencia, de forma esencial, de un sujeto epistémico, así como de la clase de conceptos que utilice para subsumir el objeto al que refieren, en tanto que es el sujeto epistémico quien, por medio del sistema métrico-operacional, justifica su derivación y su relación con otros hechos físicos.

Asimismo, hay que considerar que, si bien la idea es que las Unidades de Planck han de servir para expresar las unidades de determinadas propiedades, es requisito indispensable que su contenido tenga un correlato empírico, es decir, que se corresponda con los hechos empíricos, sólo así, su significado preservaría su valor, de no ser este el caso, no expresaría información sustantiva de los objetos y no se podría hacer uso de las Unidades de Planck en la formulación

de nuevas leyes y teorías, porque, entonces, no habría ninguna seguridad de que sus valores fueran los mismos para cualquier sujeto que las contemple en su actividad científica.

En suma, debido a que esta relación, entre la justificación teórica y matemática de las Unidades de Planck y su correspondencia con los hechos empíricos, permanece vigente es posible postular una continuidad en sentido métrico que permita que las Unidades Naturales de Planck puedan ser propugnadas como parte de la estructura base de la física teórica que garantice la relacionalidad de las teorías físicas en sentido métrico, debido a su relación con las magnitudes base canónicas de masa, longitud y tiempo.

La relacionalidad de la que hablamos yace en los elementos teóricos fundamentales que hacen posible el estudio de la realidad física y que, al ser usados por toda la estructura métrica de la física, como lo demostró el análisis magnitudinal, puedan ser llamadas fundamentales. Partiendo, pues, de los datos revelados por el análisis magnitudinal, a saber, que las teorías representativas de la física comparten la misma estructura fundacional, compuesta por las tres magnitudes base canónicas, y el Sistema de Unidades de Max Planck, fundado en las tres constantes físicas, podemos considerarlos como los elementos fundamentales e inherentes a cada teoría, por distinta que parezca, no sólo bajo contenidos específicos, sino, también, bajo un lenguaje común compuesto por las magnitudes base canónicas de masa, longitud y tiempo y sus respectivas unidades naturales. Esto deviene en una relación que garantiza un punto de partida común entre las viejas y las nuevas teorías de la física teórica.

4. Conclusiones del capítulo

En conclusión, podemos decir que el uso del análisis magnitudinal nos deja importantes contribuciones. La primera contribución radica en que su uso demuestra que la magnitud de acción es una magnitud derivada, cuyo significado físico es interpretable en función de las magnitudes de grado 4, 3, 2, 1 y de grado cero, lo que muestra, a su vez, la continuidad métrica que hay en su derivación y, al ser ésta el núcleo de la mecánica cuántica, muestra la continuidad métrica en la derivación de las magnitudes que conforman la estructura de la mecánica cuántica. Al mismo tiempo, el análisis magnitudinal deja ver que la base canónica de magnitudes físicas, compuesta por la masa, la longitud y el tiempo, es invariable a la estructura métrica de la mecánica y el electromagnetismo clásico, así como de la mecánica

cuántica. Esta invariancia da lugar a un conjunto de unidades de medida que, de la mano de constantes físicas universales, conforman el Sistema de Unidades Naturales de Max Planck, cuya importancia se mantiene, como sostuvo su creador, incluso para extraterrestres y no humanos en el sentido de que siguen siendo corroboradas experimentalmente. Esto quiere decir, por un lado, que según el análisis magnitudinal, las magnitudes base son determinantes para conceptualizar magnitudes físicas y, por el otro, que la derivación de Planck de un sistema de unidades naturales compuesto por la misma base magnitudinal y derivado de constantes universales son fundamentales en la cuantificación de propiedades físicas.

En suma, el desarrollo de este capítulo ha dejado ver que la derivación de la magnitud de acción, en conjunto con una estructura común a las teorías de la física, hace posible la continuidad en sentido métrico de la física teórica. Esta continuidad descansa, como lo muestra el análisis magnitudinal de Carmen Sánchez, en una base magnitudinal canónica e invariable compuesta por la masa, la longitud y el tiempo. Este conjunto de magnitudes posee una especial importancia que radica en la derivación que hace Planck de su Sistema de Unidades relativo a estas magnitudes, por medio de constantes universales, pues nos conduce a pensar que el fundamento teórico de la continuidad no es solamente métrico, relativo a la conceptualización de propiedades físicas, sino que, también, es epistémico, en tanto que permite obtener valores numéricos para la base magnitudinal que permanecen constantes y que son determinantes en la cuantificación de propiedades físicas. En otras palabras, esto quiere decir que el uso de un sistema de unidades naturales, en este caso, el de Max Planck, no es solamente metodológicamente conveniente en el sentido de que es práctico y universal, sino que es, también, epistémicamente relevante, pues pone de manifiesto características comunes a cualquier sistema o patrón de medida.

Dentro de la investigación, este valor epistémico adscrito al Sistema de Unidades de Planck fue abordado según la idea de que el conocimiento es desarrollado por sujetos y comunidades epistémicas que comparten un cúmulo de conocimientos y hacen uso de un mismo aparato conceptual. Estos elementos sirvieron para determinar que el alcance y los límites de las Unidades de Planck se dan en relación con la forma en la que la física teórica cuantifica y conceptualiza propiedades físicas, así como con los métodos experimentales que permiten corroborar la relación entre el valor de las unidades y los hechos empíricos.

Conclusiones generales

En este trabajo de investigación se ha hecho un esfuerzo por describir los matices de un conflicto teórico relativo a la cuantificación del fenómeno de la luz, haciendo uso de una mirada retrospectiva que permitió ver la introducción, el desarrollo y la posterior justificación de la discontinuidad energética desde un punto de vista físico teórico, es decir, desde los elementos técnicos empleados en el desarrollo de la ley de Planck, como leyes, ecuaciones, principios, hipótesis y recursos matemáticos.

El extenso desarrollo del planteamiento del problema hizo evidente que, a la base del conflicto, estaba la indeterminación matemática, el carácter determinista de las teorías clásicas e indeterminista de la ley de Planck, pero, sobre todo, se pudo hacer notar la discrepancia respecto de la cuantificación de la energía entre la física clásica y las teorías posteriores a la introducción del cuanto de acción, lo que estableció claras líneas de demarcación entre los tipos de conflictos que surgieron a raíz de la discontinuidad energética, en donde resaltaban los conflictos epistemológicos, relativos a la generación de conocimiento científico (físico), y los conflictos que se vinculaban con las expectativas de la comunidad científica en cuestión.

Un análisis más detallado hizo concluir que los primeros, los conflictos epistemológicos, atendían a la forma específica en la que se cuantificaba y conceptualizaba una propiedad física, la magnitud de acción, dirigiéndonos a los fundamentos de las teorías expuestas en relación con la naturaleza de la medición y conceptualización en la física teórica. Se hizo patente que, desde un enfoque físico matemático, la medición de la energía en bloques, o paquetes de energía, daba origen a la magnitud de acción y que ésta, al no poder ser derivada de la física clásica, constituía la clave para atacar el problema de fondo. Así, la investigación centró sus esfuerzos en evidenciar los elementos que permiten la conceptualización de propiedades físicas, con la intención de evidenciar el significado físico de la magnitud de acción, es decir, con la intención de mostrar su relación con otras magnitudes físicas y, por ende, evidenciar su naturaleza de magnitud derivada.

Los recursos utilizados en el proceso de derivación estuvieron sujetos al análisis dimensional y al análisis magnitudinal, propuesto por Carmen Sánchez en su investigación doctoral, en

donde se lleva a cabo un análisis detallado de la generación del significado físico de la magnitud de acción, desde un enfoque métrico-operacional. En otras palabras, la discontinuidad energética fue abordada desde la fundamentalidad métrica de las teorías representativas de la física teórica, para establecer que por medio de ella la continuidad métrica se da por la interrelación de los conceptos métricos que intervienen en la derivación del cuanto de acción.

La aplicación del análisis dimensional y magnitudinal a la magnitud de acción, dejó ver que no sólo ella era derivable de una base magnitudinal específica, compuesta por la masa, la longitud y el tiempo, sino que, también, se vio que las magnitudes pertenecientes a la física cuántica eran derivables de esa misma base, al ser la magnitud de acción el núcleo teórico de la física cuántica.

El uso de la investigación de Sánchez puso de manifiesto, al mismo tiempo, que por medio de un criterio extra-teórico (el análisis magnitudinal) era posible justificar la introducción del cuanto de acción, por medio de una base magnitudinal canónica e invariable subyacente a la estructura métrica de las teorías cuánticas y, también, subyacente a la estructura métrica de las teorías de la mecánica clásica y el electromagnetismo clásico, razón por la cual la idea de una continuidad métrica relativa a la física teórica fue, en principio, planteada.

Este tipo de continuidad fue abordada con ciertas reservas, puesto que es claro que, aunque un concepto métrico sea introducido justificadamente –por medio de relaciones teóricas, es decir, funciones y ecuaciones en las que aparece–, esto no significa que el desarrollo de una teoría, en la que es empleado el concepto, sea promovida automáticamente, ya que en su formulación intervienen muchos otros factores. Más aún, sí significa que a la base de las teorías físicas existen elementos comunes que las relacionan y que intervienen en su desarrollo de forma sustancial. Esta relación, basada en una base magnitudinal común, nos proporcionó, en principio, una salida a los problemas epistemológicos que subyacían a la inderivabilidad de la ley de Planck respecto de leyes clásicas, pues hizo patente que el conocimiento generado por las teorías físicas se vincula por medio de conceptos métricos específicos, y nos permitió avanzar en la investigación con la intención de reforzar la continuidad métrica de la física teórica por medio del Sistema de Unidades Naturales de Max Planck, expuesto en la tercera y última parte de la investigación.

El valor del Sistema de Unidades de Max Planck surgió a raíz de su derivabilidad por medio de constantes universales, éstas, al heredarle su carácter de universalidad a las Unidades de Planck, hacían patente, no sólo una base invariable y canónica de magnitudes, sino, también, un patrón de medida específico, definido e invariable con que medirlas.

De este modo, los elementos fundamentales e invariables que retienen su significado en el contenido, en los métodos y/o en las normas de resolución que permiten llevar a puerto un estudio físico de la realidad empírica, de los que se hablaba en la introducción de la investigación, los encontramos en la estructura métrica de la física teórica, como aquellos elementos comunes en la cuantificación y conceptualización de propiedades físicas.

El alcance y los límites de estos elementos fundamentales e invariables en el estudio físico de la realidad empírica están dadas, por un lado, por los datos experimentales que, incluso hoy, siguen comprobando la ley de Planck, por el valor de las constantes universales y por su relación con el complejo de teorías de la física; pero, por otro lado, su significado también es dependiente del aparato conceptual que caracteriza a la física teórica y que le permite obtener valores y hacer predicciones de los fenómenos físicos que son puestos a prueba, no sólo en relación con otras leyes y teorías, sino, también, experimentalmente.

Finalmente, hay que decir que, hablar de los resultados es, también, hablar de las limitaciones de estos. En primer lugar, es claro que las conclusiones de esta investigación dependen de la validez del análisis magnitudinal y del alcance de los datos obtenidos por la física teórica y su corroboración empírica, por medio de experimentos y aparatos de medida. Pero, también, dependen en gran parte de las nociones de sujeto epistémico y comunidad epistémica usadas para denotar el alcance y los límites de las Unidades de Planck, y que vimos están enmarcados por el aparato métrico conceptual y por el momento histórico en el que se encuentra la física teórica. En consecuencia, el significado de las Unidades Naturales de Planck se encuentra en una posición no definitiva, porque nada nos asegura que en un momento posterior se tenga acceso a nuevos fenómenos físicos, hasta ahora desconocidos, que no se correspondan con las magnitudes base o con las constantes físicas de las que se deriva el Sistema de Unidades de Planck. Estas consideraciones son pertinentes, porque permiten seguir trabajando, en una investigación posterior, en la justificación de la generación del conocimiento de la física teórica, así como en la relación interteórica del conjunto de leyes físicas.

Referencias bibliográficas

Arana, J. (2012). El problema de la causalidad en la mecánica cuántica. *Eikasía: revista filosófica N. 34.* , 17-34.

Arroyo, E. (2012). *Boltzmann, La termodinámica y la entropía*. National Geographic.

Blanco, D. (2012). *Einstein, La teoría de la relatividad*. National Geographic.

Einstein, A. (1905). *Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz*. *Annalen Der Physik 17*, 132-148.

Koo, E. L. (2005). La hipótesis cuántica de la luz. *Ciencias 80* , 38-48.

Kuhn, T. (1980). *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica 1894-1912*. Alianza Editorial.

Martínez, J. L. (2011). Constantes fundamentales: la última frontera para el Sistema Internacional de Unidades. *Revista Mexicana de Física* , 460-469.

Moulines. (1997). *Fundamentos de filosofía de la ciencia*. Ariel.

Sánchez Ovcharov, C. S. (2007). *Análisis magnitudinal y la estructura métrica de la mecánica cuántica*. Madrid.

Ocaña, (2020). *La Constante de Planck*. Revista Española de Metrología: e-medida. Recuperado el 20 de enero del 2022 de <https://www.e-medida.es/numero17/la-constante-de-planck/>

Penrose, R. (2002). *La mente nueva del emperador*. F. C. E.

Peréz, A. T. (2012). *Max Planck, La Teoría Cuántica*. National Geographic.

Planck, M. (1901). *Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum*. *Annalen Der Physik 4* , 553-563.

Sánchez Ron, J. M. (2005). *Historia de la física cuántica*. Critica.

Sabadell, A. (2013). *Maxwell, La síntesis electromagnética*. National Geographic.

Villoro, L. (1989). *Creer, saber, conocer*. Siglo Veintiuno Editores.

Bibliografía

Duhem, P. (2003). *La teoría física: su objeto y su estructura*. Ediciones Herder.

Gálvez F., López R. (1998). *Física*. Tébar Flores S. L. y Librería politécnica.

Kunh, T. (1971). *La estructura de las revoluciones científicas*. F.C.E.