



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
CENTRO DE INVESTIGACIONES ECONÓMICAS,
ADMINISTRATIVAS Y SOCIALES**

**MAX PLANCK ENTRE ABSOLUTOS Y PROBABILIDAD:
La tensión entre principios racionales en la emergencia de
una nueva forma de ver el mundo**

**T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
EN METODOLOGÍA DE LA CIENCIA**

P R E S E N T A:

LILIANA TARAZONA VARGAS

**DIRECTORES: Dr. ONOFRE ROJO ASENJO
M en C. AÍDA MARÍA CASTAÑEDA RODRIGUEZ CABO**

MÉXICO, D. F.

JULIO DE 2011



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 10:00 horas del día 12 del mes de Mayo del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIECAS para examinar la tesis titulada:.

"MAX PLANCK ENTRE ABSOLUTOS Y PROBABILIDAD: LA TENSIÓN ENTRE PRINCIPIOS RACIONALES EN LA EMERGENCIA DE UNA NUEVA FORMA DE VER EL MUNDO"

Presentada por el alumno:

TARAZONA
Apellido paterno

VARGAS
Apellido materno

LILIANA
Nombre(s)

Con registro:

B	0	9	1	6	3	1
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN METODOLOGÍA DE LA CIENCIA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA Directores de tesis

M. EN C. ÁIDA MARÍA CASTAÑEDA
RODRÍGUEZ CABO

DR. ONOFRE ROJO ASENJO

DR. HUMBERTO MONTEÓN GONZÁLEZ

DR. ROLANDO VLADIMIR JIMÉNEZ DOMÍNGUEZ

DRA. GABRIELA MARÍA LUISA RIQUELME
ALCANTAR

DRA. MARÍA DEL PILAR LONGAR BLANCO

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

DR. ZACARÍAS TORRES HERNÁNDEZ

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES
ECONÓMICAS ADMINISTRATIVAS
Y SOCIALES



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D. F., el día 12 del mes mayo del año 2011, el (la) que suscribe Liliana Tarazona Vargas el alumno (a) del Programa Maestría en Ciencias en Metodología de la Ciencia con número de registro B091631 adscrito a CIECAS-IPN, manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección de Dr. Onofre Rojo Asenjo y M. en C. Aída María Castañeda Rodríguez Cabo y cede los derechos del trabajo intitulado "MAX PLANCK ENTRE ABSOLUTOS Y PROBABILIDAD: LA TENSIÓN ENTRE PRINCIPIOS RACIONALES EN LA EMERGENCIA DE UNA NUEVA FORMA DE VER EL MUNDO", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección tarazona.liliana@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Liliana Tarazona Vargas

Nombre y Firma

ÍNDICE

AGRADECIMIENTO.....	2
DEDICATORIA.....	4
GLOSARIO	5
SIGLAS.....	9
RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN	12
CAPÍTULO 1. PRINCIPIOS QUE GUÍAN EL TRABAJO DE PLANCK.....	22
1.1 Max Planck dentro de la tradición física	24
1.2 La búsqueda de absolutos como objeto del trabajo científico de Planck	30
1.2.1 Sobre el mecanicismo	33
1.2.2 La termodinámica.....	37
1.3 Una nueva solución a un problema anterior: los absolutos y la probabilidad	47
1.3.1 La radiación de cuerpo negro	49
CAPÍTULO 2. LA TENSIÓN DENTRO DE LA ACTIVIDAD CIENTÍFICA DE PLANCK	57
2.1 La entropía como vínculo entre lo absoluto y lo probable	59
2.2 La tradición científica en la tensión entre principios racionales.....	71
2.3 La tensión como actividad racional.....	78
CAPÍTULO 3. LA TENSIÓN ENTRE PRINCIPIOS RACIONALES EN LA EMERGENCIA DE UNA NUEVA FORMA DE VER EL MUNDO	86
3.1 Emergencias de la tensión absoluto–probabilidad.....	87
3.2 Consideraciones ontológicas y de método emergentes de la tensión absoluto–probabilidad	90
3.2.1 La causalidad en la tensión absoluto–probabilidad.....	96
3.3 El carácter hipotético de las teorías como emergencia de la tensión absoluto–probabilidad	98
3.4 Consideraciones sobre el investigador en la emergencia de la tensión absoluto–probabilidad	102
CONCLUSIONES	109
BIBLIOGRAFÍA	115

AGRADECIMIENTO

Esta tesis corresponde a los estudios realizados con una beca otorgada por el Gobierno de México, a través de la Secretaría de Relaciones Exteriores

A la Secretaría de Investigación y Posgrado,
A la Secretaria Técnica, Dirección de Asuntos Jurídicos, y
Al Centro de Investigaciones Económicas, Administrativas y Sociales del
Instituto Politécnico Nacional.

Particularmente agradezco el apoyo de
M. en C. Aída Castañeda, Dra. Gabriela Riquelme, Dra. Carolina Manrique
Dr. Humberto Monteón, Dr. Onofre Rojo y miembros de la comisión revisora.

DEDICATORIA

Mantenerme lejos de casa durante dos años, para seguir construyendo un camino que comenzó en Bogotá, no fue fácil; en muchos momentos encontré señales de retorno que hacían que volviera mi mirada atrás. Fueron esos momentos en los que me encontré con las palabras de aquellas personas que me han impulsado a seguir, con los sueños que han orientado mi caminar, con las noticias que reportaban la necesidad de que llevara a cabo esta empresa para tener algo más que ofrecer. Así, después de pasar cada retorno, fue necesario continuar.

Encontré momentos para la discusión, la lectura y la música, con personas valiosas que construyeron un tramo de camino con migo. Personas que me permitieron entender dónde estaba dejando huellas, cuáles son las distancias que hacen las fronteras y qué permite que éstas no existan.

Hoy puedo decir que lo vivido, lo aprendido y lo logrado fue gracias a:

Don Gonzalo y Doña Carmenza, mis padres, a Raquel y Mauricio, mis hermanos, quienes desde la distancia estuvieron día a día velando mis sueños.

Dante, con quien coincidí, compartí sueños, disfruté la lectura de sus escritos, sostuve largas conversaciones, aprendí de la literatura; con quién mano a mano me sostuve en el camino.

Yuchary y mis amigos, que atenuaron las fronteras con sus esquelas.

Mi maestra, María Mercedes, por sus enseñanzas.

A ellos dedico estas páginas que son fruto del trabajo que he realizado desde la Universidad Pedagógica Nacional de Colombia hasta el Instituto Politécnico Nacional de México.

GLOSARIO

Absoluto: categoría epistemológica que se ubica en la consideración realista del conocimiento, donde se marca la independencia entre el mundo y el sujeto que lo conoce. Como principio racional guía al científico en la búsqueda de las propiedades que caracterizan el comportamiento de la realidad de la naturaleza, los absolutos; que cumplen con el carácter de universalidad e intemporalidad, para obtener una imagen unificada del mundo, sin recurrir a hipótesis especiales sobre la constitución de la materia.

Celdas de velocidad: conjunto de moléculas que se caracterizan por tener la misma velocidad.

Ciencia normal: actividad de investigación que realizan los científicos dentro de un paradigma, dentro de una tradición científica, guardando ciertos compromisos teóricos. Consiste en la articulación de los fenómenos y las teorías ya suministradas por un paradigma.

Combinatoria: rama de la matemática que estudia colecciones finitas de objetos que satisfacen unos criterios especificados, y se ocupa, en particular, del "recuento" de los objetos de dichas colecciones. Trata del número de diferentes maneras que existen de considerar conjuntos formados a partir de elementos de un conjunto dado, respetando ciertas reglas.

Composición espectral: análisis de la radiación que permite determinar las longitudes de onda de las radiaciones constituyendo una iluminancia determinada y sus intensidades respectivas.

Complejiones: posibles configuraciones de las moléculas dentro de un gas. Las configuraciones hacen referencia a la manera como se mueven las moléculas, indicando las posibles velocidades que cada una de ellas pueda tener.

Crisis: periodo previo al surgimiento de teorías nuevas, en el que existe un alto grado de inseguridad en el quehacer científico debido a que hay un persistente fracaso de las

leyes de la ciencia normal. En este periodo se exige una destrucción a gran escala del paradigma, así como grandes cambios en los problemas y técnicas de la ciencia normal.

Cuanto de acción o *quantum*: se considera como una magnitud fundamental, que constituye un límite especial entre los fenómenos microscópicos y los macroscópicos. En la explicación del cuerpo negro se refiere a la cantidad de energía necesaria que se contiene dentro del cuerpo para poder ser emitida, lo que implica que la emisión de radiación de la materia se da en paquetes de energía no en forma continua.

Cuerpo negro: modelo teórico de un cuerpo que absorbe la totalidad de radiación que incida sobre él y que de la misma manera emite toda la radiación que produzca. El objetivo es describir la interacción entre radiación y materia, determinando la manera como está relacionada la frecuencia de la radiación con la temperatura del cuerpo, en otras palabras, determinar una ecuación que diera cuenta de la distribución espectral de la radiación para diferentes temperaturas.

Entropía: magnitud física que da cuenta del estado de los sistemas respecto al cambio, indica la posibilidad de cambio en un proceso físico.

Espectroscopia: estudio de la interacción entre la radiación electromagnética y la materia por medio de un espectroscopio. El análisis espectral en el cual se basa, permite detectar la absorción o emisión de radiación electromagnética a ciertas longitudes de onda, y relacionar éstas con los niveles de energía implicados en una transición cuántica.

Espectro: o espectro energético, es la imagen o registro gráfico que presenta un sistema físico al ser excitado y posteriormente analizado. El espectro electromagnético es el resultado obtenido al dispersar un haz heterogéneo de radiación electromagnética al hacerlo pasar por un medio dispersante y transparente a dicha radiación.

Estado: forma de estar de los cuerpos o los campos respecto a una cualidad referente a un fenómeno natural. Se reconoce el estado de movimiento, el estado térmico, el estado eléctrico de los cuerpos en tanto se pueden determinar las condiciones de equilibrio mecánico, térmico, eléctrico, etc.

Fotometría: ciencia de la medida de luz, en términos del brillo percibido por el ojo humano.

Función acotada: relación entre conjuntos de valores que de manera biunívoca se relacionan. En el caso de la ecuación de distribución de energía, respecto a la longitud de onda de la radiación hay un valor máximo de energía emitida por el cuerpo, estando éste a una temperatura fija, para un determinado valor de longitud de onda.

Metrología: es la ciencia de la medida; tiene por objetivo el estudio de los sistemas de medida en cualquier campo de la ciencia. Por otra parte, la Metrología es parte fundamental de lo que en los países industrializados se conoce como *Infraestructura Nacional de la Calidad*, compuesta además por las actividades de: normalización, ensayos, certificación y acreditación, que a su vez son dependientes de las actividades metroológicas que aseguran la exactitud de las mediciones que se efectúan en los ensayos, cuyos resultados son la evidencia para las certificaciones. La metrología permite asegurar la comparación internacional de las mediciones y por tanto el intercambio de los productos a escala internacional.

Momentum: vis mortua, cantidad de movimiento, momento lineal o ímpetu, es una magnitud que da cuenta del estado instantáneo de movimiento de los cuerpos. Se define como el producto de la masa del cuerpo y su velocidad en un instante determinado.

Paradigma: son los logros que una comunidad científica particular reconoce durante algún tiempo como el fundamento de su práctica. Son las teorías, métodos y normas que dan directriz a la actividad del investigador en la ciencia normal.

Permutación: cada una de las posibles ordenaciones de los elementos de un conjunto.

Principio (absolutos): enunciado que dan cuenta del comportamiento de la naturaleza; tienen un carácter universal, son permanentes y comunes a todas las ciencias, como el principio de conservación de la energía.

Principio racional: forma en la que el científico concibe el mundo que estudia y que se deriva de la experiencia. Experiencia en tanto a la carga teórica que se constituye

racionalmente. Los principios racionales definen una lógica que guía la acción del científico y cumplen una función dentro de la explicación científica.

Probabilidad: categoría epistemológica que describe un mundo al que no se puede acceder, no se puede obtener detalle del comportamiento de cada uno de sus componentes, el mundo microscópico. Como principio racional, implica acudir a la probabilidad matemática para obtener un rango de posibilidades en las que se encuentra el estado de determinado fenómeno y se establecen las relaciones causales probables que caracterizan el comportamiento de la naturaleza.

Oscilador: o resonador, es un sistema físico capaz de crear perturbaciones o cambios periódicos o cuasi periódicos en un medio, ya sea un medio material o un campo electromagnético.

Tensión: se refiere, como en física, al estado en el que puede encontrarse un campo que se ve alterado o perturbado. En el caso de la tensión entre principios racionales, se da cuenta del estado de la actividad científica e intelectual del investigador cuando, en el ejercicio de explicación, se ve en la necesidad de reevaluar sus ideas sobre el comportamiento de la naturaleza por la presión que ejerce sobre ellas un cuerpo teórico consolidado que aporta elementos a la investigación. Actividad racional generada dentro de una tradición científica.

Teoría iónica: modelo teórico que explica la ionización. La ionización, también llamada disociación electrolítica, consiste en la liberación de los iones de un compuesto.

Vis viva: o fuerza viva, se refiere a la energía que tiene un cuerpo debido a su movimientos, es la energía cinética.

SIGLAS

PTR: Physikalisch – Technische Reichsanstalt (Instituto Imperial Físico – Técnico)

RESUMEN

La ciencia vista como una actividad de conocimiento dentro de un contexto socio-cultural obliga hacer una revisión sobre los factores que influyen en ella y que determinan sus productos, sobre los cuales se presta especial atención porque sus efectos recaen sobre el mismo contexto. Sin embargo analizando el quehacer científico, que va más allá de los productos, se ve la importancia que tiene el papel del investigador, en tanto que es quien elabora la imagen que, sobre el comportamiento de la naturaleza, realiza cada una de las disciplinas científicas. En este sentido, revisar los factores que cruzan la actividad de conocimiento del investigador conlleva a reflexionar sobre el significado que tiene el quehacer científico que supera el seguimiento de un método y coloca precisamente la actividad científica en el plano epistemológico. Uno de estos factores, que se analiza en este trabajo, es la tensión entre los principios racionales que guían el quehacer del investigador.

A lo largo de tres capítulos se presenta la tensión absoluto-probabilidad como una actividad racional, que le permite a Max Planck responder a sus inquietudes y a las necesidades de la comunidad científica en la última década del siglo XIX y primera del siglo XX. Se discuten las emergencias de la tensión absoluto-probabilidad ubicadas en cambios a nivel ontológico, lógico y de método en el trabajo de Planck. Así se recalca que la tensión entre principios racionales tiene incidencia directa en la cosmovisión desde la que el investigador realiza sus explicaciones.

Palabras claves: principio racional, tensión, entropía.

ABSTRACT

If science is understood as activity of knowledge within a socio-cultural context requires a review of the factors that influence it and determine its products, on which special attention it's paid because its effects are included in the same context. But analyzing the science, which goes beyond the products, it's seen the importance of the role of the researcher, because he elaborates the image on the behavior of nature from a scientific discipline. In this regard, the review of the factors that cross the researcher's knowledge activity leads to reflect on the significance of scientific work that exceeds the tracking method and to place the scientific activity in the epistemological level. One of these factors, discussed in this work is the tension between the rational principles that guide the task of the researcher

Over three chapters is presented the tension between absolute–probability as rational activity, that allowed Max Planck address their concerns and needs on the scientific community in the last decade of the nineteenth century and early twentieth century. The emergences of the tension absolute–probability are discussed from the changes to level ontologic, logic and methodological of work of Planck. Consequently, it holds that the tension between rational principles influence straightly in the world's conception from which the researcher conducts his explications.

Keys words: rational principle, tension, entropy.

INTRODUCCIÓN

*Todas las hipótesis de la ciencia física tienen
que pasar por un periodo de difícil gestación
antes de que puedan ver la luz del día y
pasar a las manos de los otros
investigadores en forma científica.*

Max Planck

El trabajo científico realizado por uno de los físicos alemanes que “revolucionó” el mundo de la física, con la introducción de la hipótesis de la naturaleza discontinua de la energía: con el concepto de *quantum*, Max Planck, podría caracterizarse desde los resultados de su investigación sobre uno de los fenómenos, que preocupó a los físicos de la última década del siglo XIX, conocido como el problema del cuerpo negro. Sin embargo, un acercamiento a su obra revela que sus intereses giraban en torno a la preocupación de encontrar los principios absolutos (o absolutos) que caracterizaban la naturaleza para hacerse una imagen más cercana de su comportamiento; lo cual no se conectaba directamente con las necesidades industriales y militares que pusieron el problema en manos de los científicos alemanes, sino con su posición frente al conocimiento y, con ello, a su deber como científico.

Se debe reconocer que para identificar, como lo afirma Kragh (2000), que tras el origen de la mecánica cuántica se encuentra una comprensión profunda de Planck en la termodinámica –con la definición de la entropía desde la probabilidad termodinámica y estableciendo la ley del aumento de entropía como un principio absoluto–, es necesario concebir la ciencia no sólo desde sus resultados: leyes, teorías, modelos, etcétera; también desde sus procesos, en los que tienen participación los científicos e investigadores cuyo quehacer está cruzado tanto por intereses sociales, económicos, políticos, etcétera, como por sus intereses propios, tradiciones, cuestionamientos, imaginación. Es el investigador quien da el carácter dinámico a la ciencia puesto que permanentemente está: gestando ideas, estableciendo hipótesis, realizando explicaciones sobre el mundo que le rodea. Estas actividades, en muchas ocasiones,

le exigen al investigador ponerse en conflicto consigo mismo, revisar los principios que guían sus preguntas, sus estrategias para abordarlas, reconocer las teorías en las que generalmente fundamenta sus presupuestos, enfrentar cuerpos teóricos que inicialmente no coinciden, entre otras actividades que trascienden al contenido mismo de la ciencia –como producto– y colocan al investigador como protagonista de la actividad científica.

Cuando se investiga a Planck, desde esta perspectiva, se encuentran trabajos que van desde lo anecdótico de su biografía hasta una descripción detallada de su mayor aporte a la física, como ya se mencionó: la definición de los cuantos de acción. Fueron estas fuentes las que permitieron hacer un primer acercamiento al trabajo de Planck, a sus inquietudes, particularmente como físico, y a las dificultades que tuvo que afrontar para dar solución al mayor problema de la física a finales del siglo XIX: el problema del cuerpo negro.

Varias versiones, acerca de su vida y obra, coinciden en describirlo como un hombre conservador pero revolucionario. Títulos como *Max Planck, su generación y su trágico destino* (Lozano, 2001); *La fuerza del deber: Planck* (Olalla, 2006); *Los dilemas de un hombre recto. Max Planck portavoz de la ciencia alemana (The dilemmas of an upright man. Max Planck as spokesman for German science)* (Heilbron, 1986); y *Max Planck: el revolucionario renuente (Max Planck: the reluctant revolutionary)* (Kragh, 2000), son apenas una muestra de la imagen que han expuesto algunos investigadores sobre este científico. Es la imagen de un personaje que, al igual que muchos de sus colegas, en el contexto de guerra de su país –de la última década del siglo XIX y las primeras del siglo XX– fue un intelectual comprometido con sus investigaciones y con la comunidad de científicos. Lo califican como “revolucionario a pesar de sí mismo” porque en su trabajo como físico teórico, durante este mismo periodo de cambio de siglo, fue un clásico –conservador de lo que hoy se conoce como física clásica– y un innovador radical que dejó a las nuevas generaciones el inicio de una revolución en la física; según Lozano (2001:98), el trabajo de Planck “es resultado de un conflicto entre el deseo de ser clásico y la necesidad de dejar de serlo”.

También se encuentran escritos que se centran en la obra científica de Planck, especialmente en la explicación de la solución que dio al problema de la radiación de

cuerpo negro, por la que fue reconocido y que como resultado dejó, para la ciencia, los *quantum* y, para él, el Premio Nobel de física en 1918. Una obra muy reconocida al respecto es escrita por Thomas Kuhn, titulada *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica 1894-1912*, que tiene como tesis, contrario a lo mencionado, que del trabajo de Planck no surgió la definición de la discontinuidad cuántica. Además de esta tesis, es importante la descripción minuciosa, que realiza Kuhn, del trabajo que Planck presentó a la Academia Prusiana, en una serie de cinco artículos, titulado *Sobre los procesos de radiación irreversible*, publicados entre 1897 y 1900, en la que explica la interacción entre la radiación y la materia –el problema del cuerpo negro–. En esta descripción se reseña la necesidad que tuvo Planck de comprender, desde la termodinámica la definición probabilística de la entropía, dado que fue base para su formulación de la distribución de radiación de cuerpo negro. Kuhn muestra entonces cuál fue el vínculo que tuvieron las ideas de Planck, sobre la definición macroscópica de la entropía como un absoluto, con las ideas de otro físico de la época, a pesar de que tenían grandes diferencias epistemológicas, Ludwig Boltzmann, quien admitía la definición probabilística de las magnitudes y para quien la entropía no tenía carácter de absoluto.

Los trabajos de José Luis Del Río Correa y de José Manuel Sánchez Ron, también apuntan en la dirección de Kuhn, sobre el aporte de Planck, desde y para la física, en el análisis de la interacción entre radiación y materia. Estos autores resaltan el ingenio en el tratamiento físico teórico, así como la habilidad matemática que le permitió a Planck, inicialmente, encontrar un resultado “puramente formal”, como él mismo catalogó en su *autobiografía académica* (Planck, 1958) a la ecuación que determina la distribución de radiación de cuerpo negro; y luego encontrar la explicación física que lo llevó, por un lado, a reconocer el carácter probabilístico del comportamiento de la naturaleza, que se refleja en su explicación del cuerpo negro y en la definición de la entropía, y por otro lado, a plantear la hipótesis del cuanto de acción, que sólo lo reconoce como hipótesis y trata durante mucho tiempo de explicarlo desde la teoría clásica.

Estos dos tipos de aproximación a Planck evidencian que el contexto social y científico en el que se desarrolló como físico fue controvertido y se convirtió en el campo de cuestionamiento de su quehacer. Su interés particular de definir la entropía

de manera tal que la ley del aumento de entropía en la naturaleza adquiriera el carácter de principio absoluto, como el que tenía el principio de conservación de la energía, llevó a Planck no sólo a responder el problema de la interacción entre radiación y materia sino a confrontar dos cuerpos teóricos diferentes que confluían en la definición de la entropía: la descripción macroscópica de los fenómenos físicos, desde la que Planck elaboró sus explicaciones, y la descripción microscópica, que involucraba la definición probabilística de las magnitudes físicas –desde los trabajos de Boltzmann–. Así el quehacer de Planck en la física estuvo marcado, particularmente, por un periodo de difícil gestación de uno de los conceptos más importantes en la ciencia: la entropía, dado que al integrar la mirada microscópica y la mirada macroscópica de los fenómenos dio sentido a la explicación de la direccionalidad de los procesos en la naturaleza. Este periodo se caracterizará a lo largo de este escrito como la tensión entre los principios racionales que guiaron el trabajo de Planck. Para tal caracterización se plantearon las siguientes preguntas: ¿Cuál fue la tensión que enfrentó Planck? ¿Cómo reconcilió las ideas contrarias que encontró en su trabajo? ¿Qué tipo de cambios, en el quehacer de Planck, trajo la tensión?

Estas preguntas se ubican en el contexto de estudio del quehacer científico en el cual se rescata que a la base de las revoluciones en la ciencia, utilizando la categoría de Kuhn (2006), hay problemas que pertenecen al campo de estudio de la misma ciencia, pero cuyo desarrollo va marcado por los propios intereses del científico, por sus cuestionamientos, por sus principios racionales, por las tensiones en esos principios, y que repercuten en la manera como el investigador ve el mundo que describe, en la manera como se relaciona con su objeto de estudio, sin que trascienda un cambio de la misma naturaleza a la comunidad científica –como se da en las crisis de los paradigmas científicos–. Es en este sentido que las anteriores preguntas se engloban en dos interrogantes que recogen la tesis que se discutirá a lo largo de los tres capítulos que componen este escrito: ¿Cómo de la tensión entre principios racionales emerge una nueva forma de ver y explicar el mundo? y, específicamente, ¿qué emergió de la tensión entre los principios racionales de Planck?

Para justificar que de la tensión entre los principios racionales de Planck emergió una nueva forma en la que él vio el mundo, que es la tesis central que se expone en estas páginas, fue necesario acudir a algunos trabajos de Planck; su lectura estuvo

orientada por las anteriores preguntas. Dado que se consideró que sólo desde el trabajo con las fuentes primarias se encontrarían elementos de discusión para caracterizar la tensión, sin que el centro estuviera dirigido por la interpretación de otros autores, como los ya mencionados, cuya intención es la descripción del método utilizado por Planck en su explicación del cuerpo negro, o los recursos que utilizó para definir el cuanto de acción. Entonces se trabajó con algunos escritos de Planck, escritos en los que dejó expuestos sus trabajos en física –específicamente en termodinámica y en el problema del cuerpo negro– y en filosofía de la ciencia, al que se dedicó después de darse cuenta de la puerta que había abierto con su obra de 1900 sobre la radiación de cuerpo negro. Algunos títulos fueron: *Autobiografía académica* (Planck, 1958), *¿A dónde va la ciencia?* (Planck, 1961), *The theory of heat radiation* (Planck, 1914), *A survey of physical theory* (Planck, 1960), entre otros. Se debe aclarar que las citas que se encuentran en el escrito y que provienen de textos en inglés son traducciones libres del autor de estas páginas.

Esta es una tesis en la que se ubica un contexto problemático dentro del ámbito de la física, en el que se desarrollaron las inquietudes de Planck; pero a la vez se centra en un campo dentro de la filosofía de las ciencias en el que se presenta al investigador como un sujeto que se somete a tensiones en el ámbito del conocimiento y del que emerge una forma de ver y explicar el mundo. También se enmarca este trabajo en la historia de las ciencias, porque la definición de la tensión que soportaron los principios racionales que orientaron el trabajo de Planck exigió hacer una mirada del presente hacia el pasado, aquel que quedó registrado en su obra, en las cartas que compartió con sus colegas, en su autobiografía académica; exigencia sustentada en la concepción del desarrollo de las ideas del investigador como un proceso que se da en el tiempo, cuyas consecuencias no se rescatan en un momento específico, como podría ser diciembre de 1900 cuando Planck presenta ante la Academia Prusiana la solución al problema de la interacción entre radiación y materia, sino que se ubican en las obras posteriores.

Requiere importancia hacer una aclaración respecto a dos términos que repetidas veces aparece en estas páginas y en el título: principio y tensión. Con la palabra principio se hace referencia a dos acepciones diferentes; una, referida a los enunciados que dentro de la ciencia, como lo explica Nicol (1965:294), tienen un

carácter universal, son permanentes y comunes a todas las ciencias, como el principio de conservación de la energía; son los absolutos que caracterizan el comportamiento de la naturaleza. Otra acepción, es la idea que se retoma de Bachelard (2005), y del mismo Nicol (1965), como la forma en la que el científico concibe el mundo que estudia y que se deriva de la experiencia. Experiencia en tanto a la carga teórica, “que no pertenece a la naturaleza natural sino que se constituye racionalmente” (Bachelard, 2005:89). Los principios racionales definen una lógica que guía la acción del científico y cumplen una función dentro de la explicación científica.

La elección de los principios que guían la acción del investigador está determinada por factores de orden social, cultural, político, religioso, etcétera; es decir, la actividad científica ubicada dentro de un marco social no se escapa de las líneas que determina quien ejerce poder sobre una comunidad. En el caso específico de Planck, el nacionalismo inculcado desde su formación inicial –en la Alemania de las dos últimas décadas del siglo XIX– permitió que él dedicara sus esfuerzos de orden científico y social en la búsqueda de la unidad superior: la unidad de imagen de la naturaleza y la unidad de las comunidades científicas. Una consecuencia de ello es que los absolutos que se incluyen dentro de la concepción científica de ley universal estén vinculados al ideal nacional alemán; y otra, el apoyo que recibió Planck de sus colegas vinculados al *Physikalisch – Technische Reichsanstalt (PTR)* y en la Academia de Ciencias de Berlín. En el primer capítulo se encuentra una exposición al respecto y se delimitan los principios que guían el trabajo de Planck y la manera como intervienen en la definición de la segunda ley de la termodinámica.

En la definición de la entropía Planck conjuga dos principios racionales contradictorios. Uno de ellos guiaba su investigación en la física: sólo los absolutos le permiten al científico hacerse una imagen lo más cercana al comportamiento real de la naturaleza, que se ajusta con su posición filosófica frente al conocimiento, el realismo. El otro principio racional corresponde al que guió a Boltzmann: el seguimiento de los fenómenos naturales puede realizarse desde la noción de probabilidad. Cada uno de estos principios son categorías epistemológicas que guardan una forma de entender el comportamiento del mundo y, con ello, una manera diferente de proceder frente a la explicación de los fenómenos. El primero, lo absoluto, considera la naturaleza regida por leyes universales, intemporales, fijas, exactas, etcétera, que deben ser

encontradas por el científico y definidas desde magnitudes que cumplan con las mismas características. El principio racional que admite la probabilidad describe un mundo al que no se puede acceder, no se puede obtener detalle de su comportamiento y el encadenamiento de hechos es sólo probable, entonces lo que obtiene el científico en sus mediciones es un rango de posibilidades en las que se encuentra el estado de determinado fenómeno. Así, al definir Planck la entropía como el campo en el que confluyen estos principios, se plantea en estas páginas la tensión absoluto–probabilidad como la manera de conjugar las imágenes que se tenían de la naturaleza en una sola explicación de los fenómenos.

Por su parte, el término tensión adquiere significado a lo largo del escrito, aunque se dedica especial atención en el segundo capítulo. Se refiere, como en física, al estado en el que puede encontrarse un campo que se ve alterado o perturbado. En el caso de la tensión entre principios racionales, se da cuenta del estado de la actividad científica e intelectual del investigador cuando, en el ejercicio de explicación, se ve en la necesidad de reevaluar sus ideas sobre el comportamiento de la naturaleza por la presión que ejerce sobre ellas un cuerpo teórico consolidado que aporta elementos a la investigación. En el trabajo de Planck, su interés por definir el aumento de entropía como una ley universal –como un absoluto– lo lleva a estudiar el problema del cuerpo negro pero encuentra dificultades en la formulación termodinámica que él maneja, entonces halla en el trabajo estadístico de Boltzmann una manera de resolver sus inquietudes; lo que implicó que Planck aceptara hipótesis especiales, que desde sus principios racionales negaba, sobre la composición de la materia: el caos molecular y sobre las condiciones iniciales en un proceso natural: la radiación natural; a su vez aceptar el carácter probabilístico de la naturaleza sin que su idea sobre los absolutos perdiera importancia. De aquí que se defina la tensión entre lo absoluto y la probabilidad, en el caso de Planck, y de manera general, la tensión entre los principios racionales que guían el trabajo del investigador como una actividad racional generada dentro de una tradición científica.

La tensión absoluto–probabilidad en Planck y sus emergencias hace posible caracterizar la tensión entre principios racionales como una actividad dentro del quehacer científico que le permite al investigador hacer una valoración de los resultados de la actividad científica y hacer nuevas consideraciones sobre su objeto de

estudio; en otros términos, le permite al investigador hacer una reflexión metodológica de su quehacer. La metodología entendida como un campo de conocimiento que rebasa el estudio del método y se identifica con el análisis del proceso de investigación científica desde el reconocimiento de los factores que inciden directamente sobre la ciencia misma, como las generalidades y peculiaridades del quehacer del investigador. Es en este sentido que la búsqueda de la definición de la tensión entre principios racionales y su incidencia en la cosmovisión del investigador permite discutir sobre el quehacer científico, sobre la ciencia como actividad y su carácter histórico; ubicándose la tesis expuesta en estas páginas en el campo de la metodología de la ciencia.

Caracterizar la tensión absoluto–probabilidad en Planck, implicó hacer un acercamiento a sus trabajos, desde los aportes que sobre la actividad del científico en la ciencia hicieron Thomas Kuhn (1982) en *La tensión esencial*, Gerald Holton (1982) en *La imaginación científica*, Gaston Bachelard (2005) en *El compromiso racionalista* y Eduardo Nicol (1965) en *Los principios de la ciencia*. Con Kuhn y Holton se hace una descripción de los planos que caracterizan el quehacer en la ciencia, en los que el investigador se ve obligado a responder en el plano de la tradición científica y de los productos de la ciencia: el plano contingente, según Holton, o pensamiento convergente, para Kuhn; así como a responder a sus intereses, principios racionales, necesidades explicativas: la dimensión temática (Holton, 1982) o pensamiento divergente (Kuhn, 1982). Toda actividad científica se ve enfrentada a moverse dentro de estos límites, que son flexibles, justamente por el reconocimiento de la dimensión que considera al investigador con la capacidad de optar sobre su proceder pero ligado a una comunidad, la comunidad científica.

En el desarrollo de los capítulos de este trabajo, se presta principal atención a Planck como investigador y a los resultados de su actividad, dejando a un lado el carácter de comunidad que guarda el trabajo científico, sin que pierda reconocimiento como un elemento importante dentro del quehacer científico. Precisamente es aquí donde se marca la diferencia entre la tensión esencial de Kuhn y la tensión entre principios racionales, pues en la primera se considera al científico como un individuo cualquiera de la comunidad científica, en última instancia se considera a la comunidad científica –entendida como grupo de científicos, contexto de trabajo, laboratorios, instrumentos, etc.–. Por su parte, la tensión entre principios racionales reconoce el

carácter subjetivo de la empresa científica, la necesidad de reconocer el papel de la imaginación del investigador, su capacidad de hacer sacrificios teóricos que implican sacrificios en su cosmovisión. El carácter subjetivo se integra a la objetividad de la ciencia precisamente cuando se describen, con Bachelard (2005) y con Nicol (1965), la incidencia de los principios racionales en la explicación científica, el papel de la hipótesis y las exigencias que se hace sobre los sacrificios teóricos.

El reconocimiento del carácter subjetivo de la tensión entre principios racionales conlleva a realizar una diferenciación de sus emergencias respecto a la emergencia de las crisis en la ciencia. Es recurrente ubicar a Planck en un periodo de la ciencia considerado como revolucionario, haciendo uso de la denominación que realiza Kuhn (2006) en *La estructura de las revoluciones científicas*, porque su definición del cuanto de acción llevó a un cambio en el paradigma científico con la llegada de la mecánica cuántica. Sin embargo, Planck no es quien hace precisamente parte de la revolución en la física, es la generación que le sucede la encargada de llevar a cabo el cambio de paradigma; haciendo uso de las palabras de Planck (1963:97), un cambio importante en la ciencia generalmente se da porque “sus oponentes gradualmente mueren y la nueva generación está familiarizada con la idea desde el principio”. La tensión absoluto–probabilidad se ubica en otro plano de la actividad científica cuya incidencia recae directamente en la cosmovisión y explicaciones de Planck, no implica un cambio de paradigma; es por esta razón que Planck deja el cuanto de acción como una hipótesis que no pudo comprobar, porque no pudo salir del paradigma clásico.

En el tercer capítulo, precisamente, se hace una discusión sobre las emergencias de la tensión entre principios racionales en Planck. Se encuentra que, como resultado de la explicación de la entropía como una magnitud que depende de la probabilidad termodinámica, la tensión absoluto–probabilidad llevó cambios de orden ontológico, lógico y de método. Aspectos que impactan directamente en la cosmovisión que tenía Planck y desde la que elaboraba sus explicaciones.

Respecto al cambio ontológico, se sigue a Nicol (1965) quien afirma que la relación epistemológica sujeto–objeto lleva a pensar en la relación entre el ser del sujeto y el ser del objeto. Es por esta razón que al analizar los cambios en la definición de la entropía, que era el objeto de estudio de Planck, se reconoce que el concepto en

sí mismo tiene un cambio que supera la definición simbólica, pues adquiere un nuevo significado. Este significado, resultante de la actividad de conocimiento de Planck, incide directamente en el vínculo que establece Planck entre la realidad de la naturaleza y las teorías en las que ubica los absolutos, y desde los cuales se hace una imagen de la realidad. De la tensión absoluto–probabilidad emergen las diadas macro–micro (mirada macroscópica, mirada microscópica de la naturaleza) y absoluto–probabilidad como las unidades que caracteriza una nueva lógica desde la que Planck realizó la explicación del principio de aumento de entropía como un absoluto y de la radiación de cuerpo negro. Estos cambios a nivel ontológico y lógico, conllevaron en Planck una reflexión sobre la causalidad dinámica y la causalidad probabilística, así como sobre el carácter hipotético de las teorías. Es decir que la tensión absoluto–probabilidad obligó a Planck a reevaluar los principios desde los cuales guiaba su quehacer, a realizar un nuevo tipo de preguntas sobre su objeto de investigación. Por este motivo, se considera que una de las emergencias de la tensión entre principios racionales es el cambio en el investigador.

Por esta razón se concluye afirmando que: la tensión entre principios racionales es una actividad racional del investigador, el quehacer científico implica concebir cambios ontológicos, lógicos y de método y, la ciencia es una actividad con carácter histórico. De este modo, la tesis que aquí se expone muestra una perspectiva de estudio de la actividad científica y, tomando como ejemplo el trabajo de Planck, se plantea la dinámica del quehacer científico y de investigación como un objeto de estudio que permite hablar de la ciencia.

CAPÍTULO 1. PRINCIPIOS QUE GUÍAN EL TRABAJO DE PLANCK

En todos los modernos progresos científicos vemos que la solución de un problema hace aparecer el misterio de otro. Cada cima que escalamos nos descubre otra que se eleva tras ella.

Max Planck

Por qué pensar que de súbito, de una mañana a la otra, los físicos comenzaron a trabajar con la energía cuantizada, a considerar que hay un grado de incertidumbre en la observación, que tanto la radiación como la materia tienen un carácter dual, y otras tantas ideas que están implicadas dentro de la mecánica cuántica que chocan con las ideas de la física clásica donde el científico tiene la certeza de conocer en su totalidad el mundo. Resulta natural pensar de esa manera, que no hay una transición entre la física clásica y la física moderna, cuando se concibe la física sólo desde las leyes y teorías que han resultado de un arduo proceso de investigación. Pero al centrarse en el desarrollo seguido por los científicos al configurar los conceptos o leyes que se ubican dentro de los límites de las teorías se podría encontrar, como lo afirma Labastida (2007:215), que los cambios se dan sin saltos súbitos, sin saltos radicales de un estado de las ideas a otro estado totalmente distinto, los cambios son graduales, como evolución guardan una imagen de acumulación y de equilibrio.

El desarrollo de la física, entonces, es como el espectro electromagnético visible, donde franjas de colores que se organizan del rojo al violeta se degradan sin dejar posibilidad de distinguir el lugar en donde del naranja se pasa al amarillo. Justamente en esos intersticios se encuentra el trabajo del físico alemán *Max Karl Ernst Ludwig Planck*, quien al formular la ley de radiación del cuerpo negro, definió el *cuanto de*

*acción*¹ y dio paso a un cambio en la manera de hacer física y en última instancia en la forma de ver el mundo.²

Recurriendo al desarrollo seguido por Planck, para llegar a los resultados por los que es conocido, se encuentra que su ejercicio como científico estuvo marcado por una tensión en las ideas que hasta ese momento dominaban su quehacer. Al parecer Planck, por sus intereses en el campo de la física, tomó un camino diferente al seguido por sus colegas contemporáneos, que lo llevó a salir de lo que hasta el momento se tenía en mente, tanto para él mismo como para la comunidad científica. En lo personal tuvo que admitir la propuesta estadística de Boltzmann. Y para la comunidad su trabajo implicó, por un lado, la unión de áreas de la física que no se habían logrado integrar: la termodinámica, el electromagnetismo y la mecánica estadística; y por otro, la exposición del carácter discontinuo de la energía, lo que dio paso a trabajos posteriores en la mecánica cuántica.

James Murphy, en la introducción biográfica que hace para el libro *¿A dónde va la ciencia?* escrito por Planck en 1932 (1961:19), expone la siguiente imagen que representaría el impacto del papel del creador de los *cuantos* en la física: dentro de una exposición fotográfica sobre el desarrollo de la ciencia, la fotografía de Planck sería aquella que ocuparía una esquina de la sala, y se observaría en el retrato cómo con una de sus manos se despide del pasado clásico que está a su derecha y con la otra señala el corredor donde la pintura fresca tiene los retratos de colegas como Albert Einstein, Niels Bohr, Heisenberg, entre otros científicos que aportaron a la física moderna.

Otros estudiosos de la obra y vida de Planck, como Kragh (2000) y Lozano (2001), se han encargado de exponer la imagen de este científico como la de un revolucionario renuente y un personaje de tragedia. Esto porque Planck, por un lado, fue un hombre que a pesar de vivir en una época de guerra, en la que perdió a dos de sus hijos y su casa, fue un intelectual comprometido no sólo con las investigaciones científicas sino

¹ Por este trabajo Max Planck ganó el premio Nobel de Física en 1918

² Afirma De Broglie (1965:10), la definición del *cuanto de acción* marcó un cambio en la manera de concebir el comportamiento de la naturaleza e impuso un límite inferior a las perturbaciones que el físico puede ejercer sobre los sistemas que estudia.

por la defensa de sus colegas. Y por otro lado, a finales del siglo XIX, en su trabajo como físico teórico simultáneamente fue un clásico, o conservador de lo que hoy se conoce como física clásica, y un innovador radical que haló a sus colegas contemporáneos y a las nuevas generaciones a revolucionar la física que hasta el momento era reconocida. Esto según Lozano (2001:98) “es resultado de un conflicto entre el deseo de ser clásico y la necesidad de dejar de serlo”.

Compartiendo la imagen de Murphy, a continuación se enfocará la mirada sobre el retrato de Planck; es desde allí donde se podrá entender el conflicto que menciona Lozano, y que en este trabajo se concibe como: la tensión que Planck soportó y que da sentido a la amalgama que realizó para conciliar dos ideas inicialmente contradictorias dentro de su forma de entender y explicar el mundo: *los absolutos y la probabilidad*.

1.1 Max Planck dentro de la tradición física

La fotografía dentro de la sala del museo muestra a un hombre que presencié y participó en el paso del siglo decimonónico al siglo de grandes cambios sociales, económicos y científicos, época de conflictos y de crisis. Max Planck, vivió sus 79 años (1858 – 1947) en Alemania,³ a pesar de las dos guerras mundiales no abandonó su patria, pero si tuvo que despojarse de ideas aprendidas desde su niñez. Hacer un breve rastreo de esta historia permitirá comprender la manera como este físico se enfrentó a los cambios en la forma de ver y explicar el mundo.

Formado en una familia de juristas, filósofos y hombres de iglesia, influenciado por su padre, profesor de derecho en la Universidad de Múnich, Planck se caracterizó por ser un hombre respetuoso de la ley, sistemático y conservador, no sólo en la ciencia sino en su vida pública y personal, por lo que se identificó con la figura del emperador – Guillermo I de Prusia-, y depositó en las instituciones su confianza y honestidad (Olalla,

³ Planck nació en Kiel en 1858, cuando aún no existía Alemania como el país de hoy día. Esta ciudad fue anexada a Prusia cuando Planck tenía ocho años, y seis años después Prusia sería parte de Alemania. Como reseña Lozano (2001:95), Planck conoció la guerra a una corta edad y sería una constante que marcaría su vida personal.

2006:77). Sin embargo los resultados de la guerra le hicieron revalorar su posición y así, como en el campo de las ideas científicas, se enfrentó a tensiones y cambios en su concepción de las dinámicas sociales: de la glorificación del espíritu de unidad nacional, que apoyó al iniciar la Primera Guerra Mundial,⁴ pasó a adherirse a los movimientos que propugnaban cambios en la sociedad alemana.⁵

A pesar de que su posición política no fue tan evidente, como la de su colega y amigo Albert Einstein; Planck marcó su posición y apoyo frente a la comunidad internacional de científicos. En una carta que escribe a Lorentz, en marzo de 1915, expresa su preocupación por la situación que él está enfrentando y por las consecuencias que la guerra puede traer a las relaciones entre científicos, así como su posición un tanto neutral sobre el conflicto:

En mi opinión, los científicos no afrontamos un reto más urgente, ni más bello, que aquel de aportar calladamente lo mejor de nosotros mismos para contrarrestar la continua intoxicación de nuestros combatientes y el odio creciente de los pueblos. (Planck en: Olalla, 2006: 103)

Planck era consecuente con sus palabras. Tras de mantenerse al margen de los manifiestos frente a la situación, que en la época las personalidades y científicos firmaban, él se ve en la obligación no sólo de continuar con sus investigaciones⁶, que en ese momento lo llevarían a comprender el impacto de su trabajo publicado en 1900 (y del cual se hará un análisis más adelante), sino también considera su deber de intervenir en el buen funcionamiento de las instituciones. Por esta razón, al inicio de la segunda década del siglo XX, Planck trabajó con Albert Einstein en el proyecto de erigir un instituto que apoyara el trabajo de la física teórica; en 1913 recibió el nombre de Instituto de Física Káiser Guillermo, y en 1938 se inauguró como *Max Planck Institut für Physik*.

⁴ Planck firmó el conocido *manifiesto de los noventa y tres sabios y eruditos alemanes*. En este documento se “negaba la responsabilidad alemana del estallido de la guerra, rechazaba como mentiras las supuestas atrocidades cometidas por las tropas alemanas y proclamaba la identidad del militarismo alemán y la cultura alemana” (Stern, 2003:57).

⁵ Para ampliar al respecto consultar: *La fuerza del deber: Planck* de Olalla L., C. (2006), *La historia de la física cuántica. Vol. 1. El periodo fundacional (1860-1926)* de Sánchez R., J. (2005) y *The dilemmas of an upright man. Max Planck as spokesman for German science* de Heilbron, J. L. (1986).

⁶ Dynnik y col. (1963:246) afirma que en el periodo en el que transcurrió la Primera Guerra Mundial 1914-1918, a pesar de haberse trastocado las relaciones entre los investigadores su labor científica continuó, sobre todo en aquellas esferas que cubrían las necesidades de la técnica militar.

Lo que se debe recalcar en esta historia, además del papel de Planck en la búsqueda de la unidad de la ciencia, es la influencia que tuvo la política marcada por el desarrollo científico y tecnológico, aunado a la división generada entre los científicos en el ambiente de una Alemania en guerra, en las investigaciones del momento. Registra Olalla (2006:122) que los físicos más conservadores, aferrados a la visión y tradición de la física clásica, se alinearon a la física experimental; razón por la cual los desarrollos de los físicos teóricos no tuvieron financiamiento directo y fueron considerados por los demás como productos abstractos y artificiosos.

El trabajo de Planck se vio afectado por esta situación, puesto que desde que se encontraba en la Universidad de Múnich (1874) como estudiante fue rechazado por sus maestros y por otros físicos que se preocupaban por el trabajo experimental y no consideraban como “pruebas concluyentes” el trabajo teórico (Planck, 1958:237).

Sin embargo esto no fue impedimento para que continuara con su propósito dentro de la investigación en la física y con su papel en la sociedad. Claro que se debe resaltar que las posibilidades de realizar la empresa por el buen funcionamiento de las instituciones científicas y, con ello, mantener la unidad en la comunidad científica, que se ha descrito en párrafos anteriores, se deben a la importancia que tuvo su trabajo sobre “La radiación de cuerpo negro”, presentado ante la Sociedad de Física de Alemania en 1900, que no sólo daba solución a uno de los problemas que desde 1880 era el centro de la investigación de los físicos, sino que también daba solución a preocupaciones dentro del campo de la industria, como se mostrará más adelante, y por lo cual es reconocido socialmente⁷ y dentro de la comunidad de científicos.⁸

El impacto en la dinámica dentro de la comunidad científica alemana, como ya se ha mencionado, fue resultado del proyecto que gestó el Segundo Reich desde el último cuarto del siglo XIX, que buscaba una Alemania científica y tecnológica. Esta política no

⁷ Los nazis consideraron a Planck como un científico ario mundialmente reconocido, que podía investirlos de un aire de respetabilidad (Olalla, 2006:9).

⁸ En el texto de Olalla (2006:110) se encuentra un apartado del discurso de A.G. Ekstrand, presidente de la Academia Sueca, al hacer entrega del premio Nobel a Planck en 1920. En el cual se puede reconocer la imagen que había alcanzado Planck por su trabajo al definir el *cuanto de acción*: “la teoría de la radiación de Planck es, en verdad, la referencia más importante para la moderna investigación física, y parece que aún se tardará años en extraer todos los tesoros que como resultado del genio de Planck han quedado al descubierto”.

sólo afectó la división entre los físicos sino que su papel se enfocó al campo productivo, por esto se impulsó la inversión en la infraestructura de los laboratorios en los que trabajaban los científicos; de los pocos y pequeños locales utilizados como laboratorios y los viejos gabinetes con unas cuantas herramientas se pasó a grandes espacios muy bien dotados en cada una de las veintiún universidades alemanas. Esto desde luego, afirma Sánchez (2007:87), repercutió en el número de estudiantes que asistían a clase de física, cantidad que se duplicó durante la primera década del siglo XX. Planck fue uno de esos estudiantes, y luego profesor, que se vio afectado por este cambio; no sólo contó con mejores áreas de trabajo sino también con la posibilidad de convivir con investigadores que se encontraban en plena producción científica. Y aunque el énfasis impuesto era la física experimental, el ambiente era el indicado para realizar debates a nivel de la física teórica.

Siguiendo ese ideal de nación, mientras Planck estudiaba física experimental en Múnich (1874-1877), en Berlín se fundaba el primer laboratorio de carácter nacional, el Instituto Imperial Físico – Técnico (*Physikalisch – Technische Reichsanstalt; PTR*); Berlín se estaba perfilando como la capital del imperio, en el que la ciencia y la tecnología no podían faltar. El PTR contaba con una amplia financiación, por lo que se facilitaba realizar investigaciones que los científicos no podían desarrollar en sus laboratorios particulares. Así, este laboratorio se encargaría de la investigación de cualquier problema científico y tecnológico, aunque se centró en la metrología para no entrar en conflicto con las investigaciones realizadas en las universidades o escuelas politécnicas. Este campo de estudio resultaba muy importante para la economía alemana; se lograría entrar en el mercado de la industrial mundial, ya que al establecer unidades de medida precisas los productos cumplirían especificaciones técnicas comunes en varias naciones y se podrían realizar procesos de exportación (Sánchez, 2007:92).

Una de las consecuencias de este proyecto recae en el papel del científico en el campo productivo, por lo cual sus trabajos se vincularon directamente con las necesidades de la industria de aquellos años. Un ejemplo de esto fue la solicitud que hizo la Asociación Alemana de Especialistas del Gas y del Agua (*Deutscher Verein für Gas – und Wasswefachmänner*) al PTR en 1888: encontrar una manera de evaluar la intensidad lumínica y establecer una unidad de medida que fuera aceptada

internacionalmente. Este problema involucraba a la industria de “la iluminación”, tanto como a las instituciones nacionales encargadas de la estrategia militar como la Marina, ya que el desarrollo de instrumentos fotométricos facilitaría superar inconvenientes de luminosidad bajo condiciones meteorológicas adversas (Sánchez, 2005:125). Los físicos del PTR en el laboratorio de óptica trabajaron directamente con datos experimentales sobre la radiación, que cada vez se fueron refinando.

Este trabajo tuvo entonces un gran impulso, sin embargo no fue desde la física experimental que se solucionó, fueron los avances dentro de la física teórica los que dieron la respuesta y los datos experimentales su sustento. Los montajes experimentales realizados fueron trascendentes e implicaron el ingenio y la técnica de los investigadores del PTR. Y por su parte, el fundamento teórico estaba centrado en el comportamiento de la radiación de un cuerpo ideal, el cuerpo negro.

Comenta Planck en una carta a su alumno Graetz en 1897 que sólo dos físicos trabajaron con seriedad este fenómeno, él y su alumno Zermelo,⁹ quienes no estaban vinculados al PTR dado que sus intereses no eran prácticos sino que respondían a sus inquietudes teóricas y a sus exigencias filosóficas. Heilbron (1986:19) considera que estas inquietudes tenían como objetivo resolver el conflicto entre el atomismo y la entropía, y que en este trabajo se enmarca en la tensión entre absoluto y probabilidad. Pero volviendo sobre las consecuencias de resolver el problema, se encuentra que la solución dada por Planck fue la que le dio el reconocimiento como físico teórico.

Fue notorio el apoyo que el gobierno y la industria alemana le brindó a la física, y no había por qué ponerlo en duda; para ese momento esta ciencia tenía la habilidad para suministrar conocimientos teóricos y prácticos en electricidad, óptica y termodinámica.¹⁰ En ese sentido Berlín se convirtió en la ciudad donde se concentraron la mayor parte de científicos alemanes que en el momento estaban activos y como

⁹ Según Heilbron (1986:19) tres años después de que Planck redactara esta carta, en 1900, la historia de la gran reunión internacional de físicos en París juzgó que sólo cuatro físicos en el mundo trataron el problema de la determinación de la radiación de energía de cuerpo negro como un conflicto entre el atomismo y la entropía.

¹⁰ Se contaba con las leyes de Maxwell que definían el comportamiento de los campos electromagnéticos, Hertz había identificado la luz como radiación de carácter electromagnético, y la termodinámica describía los procesos de transmisión y transformación de calor (de manera que se habían definido las condiciones para que una máquina tuviera el máximo de eficiencia).

consecuencia las universidades sólo ofrecían cursos de física experimental.¹¹ Planck así lo afirma en su “Autobiografía científica” (1958:230): “sólo cuando llegué a Berlín [luego de estudiar tres años en Múnich] comprendí que, en asuntos relacionados con la ciencia, su importancia era local”. Durante el año en el que Planck estudió en la Universidad de Berlín se encontró con científicos de la talla del fisiólogo y físico Hermann von Helmholtz y del matemático y físico Gustav Kirchhoff, quienes trabajaban para el PTR.¹²

Este ambiente académico, además del ambiente familiar, fue lo que llevó a Planck a apoyar las decisiones tomadas por el emperador y a las instituciones, que como la Universidad de Múnich y de Berlín, fueron las que le posibilitaron desempeñarse como científico y responder a los cuestionamientos que tenía frente al comportamiento de la naturaleza. Es decir, aunque Planck no fue apoyado inicialmente por sus colegas, dada la división entre físicos teóricos y experimentales, el contexto social, político y económico fue determinante para que él contara con espacios de discusión con otros físicos, con datos experimentales, publicaciones de sus colegas, etcétera. Aunque, si bien Planck contó con estos recursos, no son los que justifican por completo la presencia de su imagen en la exposición propuesta por Murphy, y con la que se dio inicio al capítulo.

Si Planck es un personaje importante en la historia de las ciencias es por el trabajo específico que desarrolló en la física y por la tensión que soportó en los principios racionales que orientaron su quehacer como científico, especialmente en la última década del siglo XIX y la primera del siglo XX; puesto que es desde aquí que Planck tuvo la posibilidad de ver de una nueva forma el mundo. Hasta ahora se ha mencionado brevemente que una de las tensiones que afrontó Planck fue respecto a la identidad nacionalista, que debió abandonar y optar por la unidad de la comunidad científica. Aunque sigue firme su idea por la identidad en una unidad ya no es centrada en la idea de nación sino de la comunidad que tiene un mismo fin, la ciencia. Como lo

¹¹ Stern (2003:49) señala que para la séptima década del siglo XIX “únicamente había dos cátedras de física teórica en Alemania (...). Esa disciplina era una especialidad abandonada y es de suponer que se había dado por agotada con todos los logros importantes que ya se habían conseguido”.

¹² Para 1888 Hermann von Helmholtz era presidente del PTR.

expresa Heilbron (1986:4) su compromiso al ideal académico de la búsqueda de la unidad del conocimiento fue el pilar sobre el cual Planck alzó su política científica.

Otra de las tensiones que Planck tuvo que enfrentar estaba en el marco de la explicación de la naturaleza, en los siguientes apartados se describirá cómo su posición frente al atomismo, a la probabilidad y a la renuncia de hipótesis especiales, las pone en discusión al momento de explicar el problema de la distribución de radiación de energía o problema del cuerpo negro. Esto muestra a Planck, particularmente, como un hombre que se ve permanentemente en la tarea de evaluar los principios de la actividad científica, pero que como se encontrará a lo largo del texto se destaca como el ejercicio que da posibilidad de emerger otra forma de ver y explicar el mundo.

1.2 La búsqueda de absolutos como objeto del trabajo científico de Planck

Volviendo sobre la fotografía de Planck, que se propuso al inicio del capítulo, y haciendo un zoom sobre el fondo de la imagen, se vería una biblioteca en la que se destacan títulos como: *La teoría mecánica del calor*, *Sobre una teoría mecánica aplicable al calor*, *Sobre la fuerza motriz del calor y las leyes que se puedan deducir de ella por la teoría del calor*, entre otros libros referentes a la termodinámica. ¿Por qué estos títulos? Éstos son escritos por el físico alemán Rudolf Clausius, quien trabajó en la teoría mecánica del calor y explicó los principios de la termodinámica, que Planck leyó de manera dedicada mientras estudiaba física experimental y que decididamente marcaron la orientación de su trabajo hacia el estudio de los fenómenos de transformación y conservación de la energía. Como lo expresa él mismo en su “Autobiografía científica” (Planck, 1958:230), en esos escritos encontró formuladas con gran exactitud las dos leyes de la termodinámica, que tenían un *carácter absoluto* dentro de la naturaleza y que como físico debía conocer.¹³

¹³ El interés por la termodinámica lo tuvo desde la adolescencia, influenciado por uno de sus maestros: el matemático Hermann Müller. Como sería en gran parte de su vida, los maestros con los que contó fueron

El encuentro con Hermann von Helmholtz y Gustav Kirchhoff, en la Universidad de Berlín, y con Rudolf Clausius, en la lectura de sus trabajos, posibilitó a Planck conocer los diferentes métodos de investigación en termodinámica y así desarrollarse en este campo. Ellos habían centrado parte de sus investigaciones en la descripción de los procesos térmicos, en los que el calor posibilitaba cierto tipo de acciones sobre las sustancias, desde una perspectiva mecanicista. Precisamente la teoría cinética de los gases, trabajada por Clausius, y la versión sobre la conservación de la energía de Helmholtz impulsaron el programa mecanicista de la física.

En la primera mitad del siglo XIX, los trabajos en electricidad, magnetismo y calor utilizaban analogías con la mecánica, debido a que se buscaba una teoría unificada de los fenómenos físicos en el marco de una concepción mecánica del mundo. Dentro de este objetivo se encuentra el trabajo de Helmholtz, *Sobre la conservación de la fuerza*, en el que define de manera clara el centro de las investigaciones de los mecanicistas: “El objetivo de la física teórica es el de explicar todos los fenómenos naturales en términos de movimientos de partículas materiales ejerciendo fuerzas entre sí” (Helmholtz en: Pérez, 2007:12). De aquí que se considere que el calor es debido al movimiento aleatorio de las partículas que componen los cuerpos y medios materiales. Una muestra de las consecuencias de esta concepción de la naturaleza en la descripción de los fenómenos vinculados al calor se encuentra en el libro de Clausius titulado *The mechanical theory of heat, with its applications to the steam Enghien and the physical properties of bodies*, en el que realiza una exposición mecanicista de las propiedades térmicas de los gases. Es interesante ver cómo, acudiendo a una imagen de la estructura de los gases, Clausius dio cuenta de los efectos sensibles de los procesos térmicos (Cardwell, 1971:128).¹⁴

quienes marcaron el rumbo de su trabajo, pero no quienes lograrían poner su imagen en el museo que propone Murphy; Planck tuvo que batallar hasta con ellos para que sus ideas fueran tenidas en cuenta. Fue en las clases de Müller que Planck reconoció la importancia de la conservación de la energía como una ley de carácter absoluto (Planck, 1958:229), idea que determinaría sus investigaciones. Así su interés al entrar en la Universidad de Múnich fue aclarar aquellas cuestiones que desde adolescente tenía sobre la concepción de mundo –un mundo regido por leyes absolutas–.

¹⁴ Así por ejemplo la expansión permanente de un gas al ser calentado, efecto macroscópico, la explica Clausius por la débil atracción entre las moléculas que conforman el gas, efecto microscópico, que ofrece una resistencia muy pequeña a la expansión (Cardwell, 1971:128). Señala Pérez (2007:15) que en la explicación de este proceso, realizada por Clausius, se encuentra que una parte del calor es invertido en superar la atracción mutua entre moléculas, existiendo un trabajo interno (lo que se conoce hoy como

Dentro de esta tradición científica, en la que Planck se formó, el mecanicismo fue una herencia que recibió y orientó sus investigaciones, especialmente en termodinámica.¹⁵ De manera que desde ahí emergió el principio racional que fundamentó su trabajo en física, lo absoluto; que se caracteriza por la búsqueda de principios absolutos y la búsqueda de la unidad en la física sin acudir a hipótesis especiales.

Es preciso hacer un llamado en este punto, porque como ya se planteó, el trabajo que Planck publicó en 1900 es muestra de la tensión que soportó en su principio racional. De acuerdo con Nicol (1965:16), las ideas que fundamentan la posición de los científicos determinan las direcciones generales de su trabajo, de tal manera que si se ven llevados a cambiarlas alteran el sentido que conceden a su propio esquema simbólico y a la interpretación que dan en sus investigaciones. En otras palabras, los principios racionales determinan la forma como el científico concibe el mundo que estudia y las tensiones en éstos dan la posibilidad a que se reconozcan nuevas relaciones en la realidad que se investiga, así como utilizar otras formas de indagación, de representación, etcétera.

Justamente desde el mecanicismo –que para algunos científicos, incluido Planck, es una forma de concebir el mundo– se pueden entender los principios racionales que guiaron el trabajo de Planck y que al entrar en tensión, al resolver el problema de la distribución de radiación de energía, le permitieron “ver” su objeto de estudio –la naturaleza– de otra manera.

Por esto, describir los elementos que caracterizan el mecanicismo vinculados con las ideas que Planck expone en algunos de sus trabajos permite, por un lado, detallar los principios racionales que orientaron sus investigaciones. Y por otro, tener elementos que posibilitan analizar la tensión a la que se vieron expuestos.

energía interna), mientras que otra parte del calor es utilizado para mantener el equilibrio entre la presión del gas y la presión exterior, que corresponde al trabajo del efecto mecánico exterior.

¹⁵ Gran parte de la obra de Planck se centra en la explicación termodinámica de las leyes que describen procesos físicos y químicos. Después del impacto que tuvo su trabajo que define el cuanto de acción y que dio vía al desarrollo de la mecánica cuántica se dedica a realizar conferencias y artículos en los que expone su posición sobre la filosofía de la física y las implicaciones de la física moderna en el papel del investigador.

1.2.1 Sobre el mecanicismo

Heisenberg (1979:16) describe de la siguiente manera uno de los aspectos epistemológicos que caracterizan el mecanicismo: la ciencia sigue el supuesto que se investiga, la naturaleza, como *realmente* es. Se imagina un mundo que existe en el espacio y en el tiempo y que obedece a las leyes naturales independientemente de cualquier sujeto observador. Es decir que se tiene una idea de realidad independiente, de objetos físicos con unas propiedades, con unas cualidades primarias, que sólo son organizadas por el sujeto que las estudia. Esta consideración se vincula al primer aspecto característico del mecanicismo, que aquí se menciona, el objetivismo.

Los trabajos que realiza Planck en física describen el mundo físico, considerado éste como una realidad independiente del hombre. Por lo que se podrían distinguir las leyes que formula el científico de las leyes que rigen la naturaleza. Así lo expresa en su autobiografía académica:

[Es un] hecho obvio que las leyes del razonamiento humano coinciden con las leyes que rigen las series de impresiones que recibimos del mundo que nos rodea y, en virtud de ello, es que el razonamiento puro puede permitir al hombre formarse una imagen de dicho mundo. (Planck, 1958:229)

El trabajo de Planck se ubica, entonces, en el realismo tradicional. Según Montes De Oca (1997:275), desde esta corriente se considera que el conocimiento se da en tanto “la presencia de dos realidades independientes: el sujeto que conoce y la cosa o realidad sustantiva conocida”, pero se da mayor importancia al objeto. En el caso de Planck, la realidad sustantiva es la naturaleza y es precisamente trabajo del científico conocerla. La meta de la ciencia es el establecimiento de una imagen del mundo.

Dependiendo de las concepciones epistemológicas de los investigadores, considera Planck, debe haber matices que varían entre la imagen del mundo de cada uno. Sin embargo “ninguna revolución en la Naturaleza o el hombre puede eliminar [las] propiedades [de la imagen]”. La independencia entre el mundo y la “individualidad intelectual”, se representa en la permanencia de las propiedades que caracterizan el comportamiento de “lo que llamamos realidad” (Planck, 1960:24). Las propiedades encontradas en la imagen del mundo, son los *absolutos* que debe buscar el científico.

Otro aspecto que caracteriza al mecanicismo es el reduccionismo. Como la palabra lo indica, implica reducir todas las explicaciones de los fenómenos a consideraciones basadas en la mecánica, tal como se señaló páginas atrás con unas líneas del trabajo de Helmholtz. Por ejemplo, reduciendo la termodinámica a la teoría de los choques de partículas, cantidades como la energía mecánica se vinculan a la explicación de los procesos termodinámicos.

Sánchez (2005:122) retoma parte del prefacio del trabajo de Planck titulado: “Lecciones sobre termodinámica”, publicada en 1897, en el que reconoce que existen tres métodos de investigación en el desarrollo de la termodinámica. Uno es la interpretación mecánica, en la que se dan las características de las moléculas o átomos que conforman las sustancias en estudio, tal como lo hace Clausius en la teoría cinética de los gases. Otro es la mecánica del calor, donde “se rechaza por principio inquirir el carácter del movimiento” que genera el calor, desarrollado por Helmholtz. Y el último método que describe no acude a “suposiciones concretas acerca de la naturaleza del calor”, sino que parte de algunos hechos empíricos generales y reconoce el principio de conservación de la energía como el único que explica los procesos, ésta es la concepción energetista.

Los dos primeros métodos se vinculan a la idea de reducir los fenómenos a una imagen descrita por el movimiento de pequeños cuerpos masivos que cumplen las leyes de Newton, esta sería para Planck una hipótesis especial. El tercer método es otro tipo de reduccionismo que Planck lo describe, en el mismo texto, como aquel que permite considerar la actividad de la naturaleza (sea ésta el calor, el movimiento, la electricidad, etcétera.) como diferente en cualidad sin entrar a considerar un comportamiento común, como en el caso de los anteriores métodos.

Sin embargo, Planck aclara que “nunca se podrá reprimir de forma permanente la aspiración de lograr una teoría uniforme de la naturaleza, con base mecánica o de otro tipo” (Planck en: Sánchez, 2005:122) por lo que resulta relevante el descubrimiento¹⁶ de principios como el de conservación de la energía –que inicialmente fue descrito en

¹⁶ Notar el uso de esta palabra, es dar sentido a la característica de objetividad del mecanicismo. Descubrir implica que hay un sujeto activo ajeno al objeto que conoce, la naturaleza; la que tiene unas leyes independientes del investigador.

la mecánica—. Esta sería, en el pensamiento de Planck, la dirección que las investigaciones científicas debían tomar. Entonces para 1887 es determinante en el trabajo de Planck sacar todas las consecuencias que la visión mecánica podía traer en áreas como la física, la química, etcétera,¹⁷ (Planck en: Kuhn, 1980:41) y al parecer el principio de conservación de la energía lo permitía sin necesidad de acudir a hipótesis especiales como el comportamiento de las moléculas que componen los cuerpos. De aquí que se tenga otra consideración para el reduccionismo.

El reduccionismo, según Bohm (1959:75), también puede ser considerado al expresar en forma de leyes puramente cuantitativas las “entidades básicas” (cuerpos o campos) que aparecen en la experiencia, cotidiana y científica, que nunca cambian cualitativamente; leyes que determinan el comportamiento de una clase de entidades o variables básicas.

Como ya se mencionó, Planck considera la existencia de principios absolutos caracterizados por ser “correctos, definitivos” y que se encuentran en las magnitudes que permanecen constantes. “[Describirlos] y explicar en virtud de ellos todos los procesos físicos y químicos puede ser considerado (...) como el fin último de la investigación científica” (Planck, 2000a: 71). Es así como el reduccionismo no se funda en una “estrecha concepción de los fenómenos naturales” (Heilbron, 1986:15) sino que implica el descubrimiento de los principios que permanecen en cualquier fenómeno de la naturaleza; es decir, de acuerdo con Nicol (1965:13), una característica de los principios es que sean universales, como el principio de conservación de la energía. Los *absolutos* que busca Planck son universales y desde ellos se consigue una imagen unificada del mundo.

La idea de unificación, o mejor de unidad, sustenta el reduccionismo. La realidad que se describe es única, existen en ella principios que rigen cualquier fenómeno que se manifiesta. Por lo que la búsqueda de explicaciones del mundo físico, significa la investigación de “correlaciones de varias observaciones dentro de un sistema

¹⁷ Desde 1887 Planck escribe varias monografías bajo el título *Sobre el principio del aumento de entropía*, en las que abordaba las leyes de las reacciones químicas, la disociación de gases y las propiedades de las soluciones diluidas (Planck, 1958:234). Por lo que tenía conocimiento del comportamiento macroscópico de las sustancias y aunque reconocía la existencia de átomos y moléculas, sólo podía hacer uso de los principios de la termodinámica por ser los *absolutos* de la naturaleza.

unificado, y, cuando sea posible, dentro de una única fórmula” (Planck, 1960:1). Así de acuerdo con el objetivismo, las leyes del racionalismo humano, o el sistema unificado, deben dar cuenta de cualquier manifestación que se perciba.

El último aspecto que aquí se considera como característico del mecanicismo es el determinismo. Conocer el estado inicial de un cuerpo (o un campo) permite determinar cuáles serán las situaciones futuras (principio de causalidad). Se considera entonces que es posible asignarle al objeto de estudio un estado definido en cada instante. Así, por ejemplo, con la ley de conservación del *momentum*, una vez conocidas las velocidades y las masas de dos cuerpos que chocan, se puede determinar cuáles serán sus estados de movimiento después de la interacción.

Esta característica que tiene el comportamiento de los fenómenos físicos subyace a la idea de orden de la naturaleza y la certeza en la explicación que se dé. La explicación mecanicista concibe sucesiones causales; que así, como dan cuenta de los fenómenos naturales, también explican el desorden observado.

Bajo estas ideas, Planck sustenta su negativa a la inclusión del cálculo de probabilidades en la definición de variables físicas, precisamente porque las magnitudes que dan cuenta del estado de un sistema permiten el seguimiento de su evolución en el tiempo. Es así que respecto a la teoría electrodinámica, Planck (1914:113) afirma que las ecuaciones de campo, junto con las condiciones iniciales y de frontera, determinan la forma en que un proceso electrodinámico se lleva a cabo en el transcurso del tiempo. En este sentido Planck afirma que:

La causalidad estrictamente dinámica debe merecer nuestra preferencia, simplemente porque la idea de un universo gobernado por leyes dinámicas le da una más amplia y profunda aplicación que la idea meramente estadística (...) No he sido capaz de encontrar ni el más leve motivo en [la física estadística] que obligue a renunciar a la aceptación de un universo estrictamente gobernado por leyes. (Planck, 1961:104)

De esta manera se observa cómo las ideas desde las que Planck dirige sus investigaciones están enmarcadas dentro del mecanicismo. Al respecto Einstein en sus “*Notas autobiográficas*” señala cómo varios físicos jóvenes, incluido él y Planck, fueron influenciados por el trabajo del físico alemán Ernest Mach, quien desde su obra, titulada *Historia de la Mecánica*, mostraba la mecánica clásica como una base firme y

definitiva para la física (Einstein en Olalla, 2006: 87). Sin embargo, teniendo este marco, Planck no admitía las ideas sobre la mecánica de los gases o la explicación mecanicista del electromagnetismo, precisamente porque implicaba la inclusión de hipótesis especiales sobre la constitución de la materia.

Ahora bien, Planck no sólo fue formado dentro del paradigma mecanicista, sino que tenía una seria preocupación por el estudio de los fenómenos térmicos debido a la influencia del trabajo de sus maestros.

1.2.2 La termodinámica

La concepción mecanicista obliga a la búsqueda de la unidad en la explicación científica. Al considerar el mundo como una única realidad que se presenta al hombre y que se comporta de acuerdo a leyes *absolutas*, el trabajo del científico es descubrir leyes para explicar o describir los fenómenos que percibe y que coincidan con los absolutos de la naturaleza. Entonces, particularmente para Planck, los recursos a los que acuda el científico para realizar esta tarea deben ser tales que no se planteen hipótesis especiales sobre comportamientos que no son posibles de observar y cuya consecuencia ponga en duda precisamente la unidad y los absolutos.

Es así como Planck encuentra en la termodinámica, específicamente en las leyes que describen los procesos termodinámicos, una forma de realizar su trabajo. Heilbron (1986:9) afirma que la termodinámica de mediados del siglo XIX, es decir la que Planck leyó en los trabajos realizados por Rudolf Clausius y William Thomson, se puede denominar como doctrina de la conservación, transformación y degradación de la energía.¹⁸ Por lo que, al atribuirse el término de doctrina, se pretendía que todas las leyes de la física se ajustaran al principio de conservación de la energía y al aumento de entropía –primera y segunda ley de la termodinámica, respectivamente–. Es decir,

¹⁸ La conservación y la transformación de la energía fueron utilizados en el trabajo que realizó Sadi Carnot para determinar el ciclo de mayor eficiencia de una máquina térmica y fue retomado por Clausius así como aceptado por la mayoría de físicos del momento. Sin embargo la degradación de la energía aún era un foco de discusión a finales del siglo XIX; aunque se reconocía que en la naturaleza cierta cantidad de energía no se podía transformar, en todos los casos de estudio consideraban sistemas ideales y procesos reversibles.

se pretendía describir la manera como se daban los cambios percibidos en los procesos físicos¹⁹ y la búsqueda de lo que permanecía constante en los procesos de la naturaleza.

Recordando la formación familiar que recibió Planck, entre juristas y teólogos, y rescatando dos puntos importantes de la información que da Heilbron, la termodinámica como doctrina y la búsqueda de lo constante, se encuentra el motivo por el que Planck se interesó por comprender la ley de conservación y la búsqueda de absolutos, desde la termodinámica.

Respecto a la idea de doctrina que tiene la termodinámica y que se vincula tanto con la idea de un único conjunto de leyes que dan la imagen de todos los fenómenos de la naturaleza, se encuentra una relación con la idea de los alemanes de establecer leyes que rijan la nación (vista como unidad). Entonces, encontrar una relación directa entre las leyes de la termodinámica con el comportamiento de los fenómenos naturales sería, según Planck, una de las tareas principales de cualquier físico. Esta búsqueda desde las leyes de la física haría posible tener una imagen de las leyes naturales.

Ahora, la búsqueda por la constancia que “desde Aristóteles se había identificado con la verdad y el bien” (Heilbron, 1986:9), se liga por un lado con el carácter tradicionalista y conservador de Planck, que como se describió en líneas atrás caracterizaron sus acciones. Por otro lado, se liga con la concepción objetivista del mecanicismo, al concebirse la posibilidad que tienen los hombres de conocer la realidad que se les presenta; el trabajo del físico, para Planck, implica lo absoluto: la búsqueda de lo que es real, puro y por tanto verdadero, es decir la búsqueda de *absolutos*. Esto sin acudir a hipótesis de las cuales no se pudiera dar cuenta.

Con este referente se considera que las ideas con las que se encontró Planck al estudiar los trabajos de Clausius causaron gran impacto en su búsqueda. Se encontró

¹⁹ En este aspecto podemos encontrar el trabajo de transformación de la energía mecánica en calor. Fue con el trabajo de Joule que se encuentra la manera de definir un equivalente mecánico del calor, desde el que se puede dar cuenta de la relación que existe entre el trabajo mecánico realizado, por ejemplo al elevar un peso, y el calor producido, que en el ejemplo se percibiría por el ascenso en la temperatura de un líquido que esté en contacto con el sistema del peso. Se conserva la cantidad de energía del sistema, aunque exista un cambio en el sistema al transformarse la energía.

con la formulación de las dos leyes de la termodinámica²⁰ –el principio de conservación de la energía y el principio de aumento de entropía–. Estas definiciones no incluyen la necesidad de definir una hipótesis especial sobre la constitución de la materia, pues basada en los procesos de transformación de calor en trabajo, los principios quedan definidos en términos de las condiciones necesarias para que se presenten dichos procesos.

De esta manera Planck reconoce que la termodinámica tiene un valor especial. En tanto que procesos físicos y químicos, a los que se asocia una imagen corpuscular que cumple con las leyes de la mecánica (visión reduccionista del mecanicismo), pueden ser explicados al encontrarse la dependencia de las fuerzas entre las partículas respecto a la temperatura, “sin que sea necesario introducir supuestos especiales acerca de la constitución molecular de los cuerpos” (Planck en Kuhn, 1980:42).

Recurrir a una reducción que liga el movimiento molecular con manifestaciones macroscópicas percibidas, expresa Planck en 1894 frente a la Academia de Berlín, implicaría introducir “un número de modelos mecánicos diferentes de acuerdo a cada proceso físico” (Heilbron, 1986:16), es decir que para cada fenómeno existiría una imagen especial y se perdería el objetivo de tener una imagen única de la unidad de la naturaleza.²¹ “La imagen de unidad implica que cada parte es indispensable y posee un significado especial en relación a las otras” (Planck, 1960:20). Sin embargo, la definición de las leyes de la termodinámica se puede realizar sin depender de hipótesis moleculares o atómicas; con esto Planck no pone en duda la existencia de átomos y moléculas, sino que en busca de la unidad opta por la descripción macroscópica y continua de los fenómenos naturales.

Para aclarar este último punto se acude a un pie de página del *Tratado sobre termodinámica* en el que Planck (1945:85) expone cómo, de la definición realizada por

²⁰ Trabajo que partió de la inquietud por construir una máquina de movimiento perpetuo. Joule había establecido la relación entre calor y trabajo mecánico, Carnot definió las condiciones de un ciclo ideal que generara la máxima eficiencia de una máquina.

²¹ Esta es una de las ideas que configura la tensión entre lo absoluto y la probabilidad, pues desde la mirada mecánica de Boltzmann sobre los procesos térmicos de los gases, con la cual define la entropía como una medida de la probabilidad de los estados mecánicos de las moléculas, se encuentra la necesidad de resolver la cuestión por las diferentes configuraciones o modelos mecánicos que generan un mismo valor de las cantidades físicas observables.

Clausius, el segundo principio de la termodinámica establece que el calor no puede pasar de un cuerpo frío a uno caliente *sin compensación*,²² por lo que la entropía se define a partir de la relación entre calor y temperatura que son variables macroscópicas que describen los procesos térmicos. Esta es la razón por la que Planck abre el capítulo primero de su tratado justificando lo prescindible de recurrir a una imagen de la composición de materia para dar cuenta de los principios de la termodinámica;²³ pues es suficiente, para hacerse una imagen del comportamiento de la naturaleza, conocer las condiciones para que procesos macroscópicos se den, como la producción de trabajo por una máquina térmica. Así lo expresa Planck:

Podemos, como es resuelto en este trabajo, dejar abierta la cuestión concerniente a la posibilidad de reducir todos los procesos naturales al movimiento y comenzar con el hecho que ha sido examinado durante siglos por la experiencia humana y verificado reiteradas veces, esto es que no hay manera posible, ya sea por medios mecánicos, térmicos, químicos u otros, para obtener movimiento perpetuo, es decir, es imposible construir una maquina que trabaje en un ciclo y produzca trabajo continuo o energía cinética de la nada. (Planck, 1945:40)

En este sentido Planck encuentra la termodinámica como una teoría en la que se plantean las *condiciones de posibilidad* de los procesos naturales, un espacio en el que podía centrar su búsqueda de los absolutos en la naturaleza y con ello dar cuenta de los fenómenos, sin recurrir a hipótesis especiales sobre la constitución de la materia. Ya que el principio de conservación de la energía y el principio de aumento de la entropía limitan los fenómenos naturales, en tanto sólo es permitida la transformación de la energía más no la creación o destrucción (primer principio) y sólo se permiten cierta clase de transformaciones, bajo ciertas condiciones (segundo principio) (Planck, 1960:7). Con esto se refería Planck a la posibilidad de contar con dos leyes, definidas

²² Esto implica que en los procesos espontáneos de conducción de calor se dan sin necesidad de intervenir sobre los cuerpos que están interactuando, lo espontáneo indica la tendencia hacia el equilibrio, en este caso, térmico; es decir que el cuerpo con mayor temperatura cede calor disminuyendo su temperatura y el cuerpo con menor temperatura la aumentará por efecto del calor conducido. Pero al considerar la conducción de manera que el cuerpo de menor temperatura se enfríe y el cuerpo con mayor temperatura se caliente, proceso que no es espontáneo, es necesario considerar la existencia de algún mecanismo externo que realice trabajo sobre los cuerpos. Es por este motivo que Clausius hace referencia a la necesidad de una compensación en procesos que no son espontáneos y define así las condiciones de posibilidad de procesos naturales, o que se dan de manera espontánea en la naturaleza.

²³ Precisamente por esta idea contraria a la de sus maestros, quienes consideraban los procesos termodinámicos desde el movimiento y fuerza entre las moléculas de los cuerpos, su tesis doctoral sobre la entropía no fue valorada, y en cierta manera sólo fue reconocido por su desempeño como buen estudiante, pero no por sus aportes al desarrollo de la física que en el momento se estaba trabajando.

en términos de funciones, que describen los procesos naturales y cuyos casos límite darían cuenta de las idealizaciones.

El principio de conservación de la energía fue considerado por los físicos desde la discusión entre Descartes y Leibniz sobre la conservación de la *vis viva* y la *vis mortua*, y para finales del siglo XIX no era puesta en duda su validez. Para Planck era la primera ley cuya validez universal estaba totalmente independiente de toda intervención humana (Planck, 1958:229). Por lo que junto con los conceptos de espacio y tiempo absolutos, de la mecánica newtoniana, es un principio común a diferentes regiones de la física.

Así el principio de conservación de la energía cumplía con las características de un principio *absoluto* pues da una imagen completa de la naturaleza. En tanto la unidad no discrimina el fenómeno que se esté estudiando o que se manifieste. De igual manera es un principio “autónomo, libre e independiente de las vicisitudes de su desarrollo” (Planck, 1960:6), es decir que desde su formulación y su participación en la descripción de la naturaleza no se ve afectado por los factores que entren en consideración del investigador.

El segundo principio de la termodinámica da cuenta de la preferencia que la naturaleza tiene en los procesos por el estado final, que indica un estado de equilibrio.²⁴ Esta preferencia queda determinada por la medida de la entropía. Así la entropía era, después de la energía, la propiedad más importante de los sistemas físicos; aunque en el momento que Planck se dedicó a estudiarla había discrepancias entre los físicos sobre su carácter de ley universal.

Sin embargo para Planck, el aumento de entropía era otro principio absoluto en tanto da cuenta de las posibilidades de transformación de la energía; desde éste, los sistemas se dirigen a estados de equilibrio que serían los de mayor entropía, y en tanto da cuenta de las condiciones para que se dé dicha transformación. A este respecto en el trabajo de Clausius encuentra que la entropía define que el calor no pasa espontáneamente desde un cuerpo frío a uno caliente sin compensación,

²⁴ “La entropía era para mí después de la energía, la propiedad más importante de los sistemas físicos. Puesto que su valor máximo indica un estado de equilibrio, todas las leyes del equilibrio físico y químico derivan del conocimiento de la entropía” (Planck, 1958:232).

espontáneamente se da en sentido contrario y esto se refleja en un aumento de entropía. Planck (1958:231) define como conveniente hablar de este principio en los siguientes términos: “el proceso de conducción del calor no puede ser invertido completamente en forma alguna”. Precisamente porque es desde este principio que se puede clasificar los procesos entre “naturales” y los que no lo son, o en otras palabras entre los procesos irreversibles y los procesos reversibles.²⁵

La posibilidad de explicar la dirección de los procesos, desde la definición de la entropía significa determinar el paso de un estado inicial a uno final, así debe dar cuenta de la reversibilidad o irreversibilidad de los procesos naturales. Si los estados inicial y final son iguales, el proceso es reversible y la entropía es constante; pero si hay alguna diferencia, la entropía mostraría una desigualdad en cada parte del proceso.

Considerar la reversibilidad de los procesos implicaba en muchos casos hacer abstracción de algunos factores que generaban una degradación de la energía que no permitía que el proceso inverso fuera completamente el mismo. Así como en el caso de la mecánica, un péndulo que se pone a oscilar en algún momento dejará de moverse por efecto de la fricción del aire, en este caso para que fuera reversible el péndulo tendría que regresar frecuentemente al estado inicial del movimiento. Los procesos directamente reversibles constituyen un caso límite, una idealización.

Precisamente la idealización había sido el centro de las investigaciones de los maestros de Planck, y es ahí donde se encuentra el mayor distanciamiento de las ideas de Planck con las de Clausius. Mientras éste último define las leyes de la termodinámica considerando procesos reversibles, Planck realiza su tesis desde la definición de los procesos irreversibles que son los procesos “naturales” (Kuhn, 1980:45).

Retomando la visión mecanicista de Planck por la búsqueda de leyes que den una imagen de la naturaleza, encuentra en la segunda ley de la termodinámica una forma

²⁵ Planck define de la siguiente manera un proceso natural o irreversible: “un proceso el cual no pueda ser completamente invertido es llamado irreversible, todos los otros procesos son reversibles (...). El requerimiento completo es, que será imposible, aun con la asistencia de todos los agentes en la naturaleza, restaurar cada uno de los estados iniciales exactamente cuando el proceso ha tomado lugar” (Planck, M., 1945:84)

de hablar de cualquier fenómeno natural. Porque, si la entropía da cuenta de las condiciones para que se dé la transformación de la energía y, la transformación de la energía, en términos del primer principio de la termodinámica, es un absoluto que no sólo implica procesos térmicos, entonces la entropía debe tener este mismo carácter.

De esta manera la entropía permitiría a los físicos tener una imagen más cercana a la unidad de la naturaleza. Desde las categorías de reversibilidad e irreversibilidad, o constancia y aumento de entropía, se reduce las posibilidades de clasificación de los fenómenos²⁶, que como hasta el momento se venía haciendo dependía de su naturaleza: fenómenos mecánicos, eléctricos, térmicos, magnéticos, etcétera. Esto se recoge en la siguiente cita de Planck:

La diferencia entre procesos reversibles e irreversibles es mucho más profunda que entre procesos mecánicos y eléctricos. Por lo que podría (...) ser la base más conveniente para la división de todos los fenómenos físicos. (Planck, 1960:12)

En este sentido para Planck constituía una exigencia poder definir como un principio *absoluto* la *ley del aumento de entropía*. Afirma Dynnik (1963:446) que Planck, al ocuparse de las cuestiones termodinámicas, hizo hincapié en el significado objetivo de las leyes, de tal manera que la definición de la primera ley contaba con “una absoluta independencia de todo punto de vista humano y técnico”. Sin embargo, a diferencia del principio de conservación de la energía, la segunda ley de la termodinámica aún no contaba con la posibilidad de ser extendida a todos los fenómenos y no dejaba de estar ligada a la manera como el científico pretendía medirla.

Se encuentra así nuevamente, como se describió en el acápite del mecanicismo, las diferentes maneras como era concebido el estudio de los procesos termodinámicos. Por un lado se encontraban los energetistas, quienes en su objetivo de colocar la energía, y con ello el principio de conservación, como la causa de todos los fenómenos físicos consideraban el segundo principio como una derivación de la primera ley. Esto quitaba el grado de principio absoluto a la entropía y ponía en igualdad de condición a los procesos reversibles e irreversibles (Olalla, 2006:41). En tanto que, como comenta

²⁶ Afirma Planck, en *Filosofía de la física* (1963:11), que el problema de cualquier ciencia es encontrar un principio que permita clasificar los fenómenos –los objetos de estudio–. Encontrarlo es “el paso decisivo en el desarrollo de la ciencia”.

Planck (1958:237), se proponían analogías entre fenómenos térmicos y fenómenos mecánicos en los que la inversión del tiempo no afectaba su descripción, no habría tal clasificación de los procesos. Por ejemplo, la transmisión de calor entre dos puntos a diferente temperatura y la sumersión de un peso desde una altura mayor a una menor. En la sumersión la energía potencial se transforma en energía cinética en tanto existe el campo gravitacional que realiza un trabajo sobre el peso, y es posible hacer el ascenso del cuerpo realizando un trabajo igual y volver a la disposición inicial del peso. Sin embargo, en la transmisión de calor es necesario que exista una diferencia de temperaturas entre dos cuerpos para que, de manera espontánea, se dé la conducción de calor del cuerpo de mayor temperatura al de menor; pero no así en sentido contrario, si se quiere obtener el estado inicial de los cuerpos, en este caso es necesario intervenir sobre el sistema.

Por otro lado, para la última década del siglo XIX la propuesta atomista²⁷ tenía reconocimiento, en tanto que se realizaban trabajos que explicaban fenómenos que se observaban no sólo en los laboratorios de física sino en los de química, por ejemplo el modelo molecular propuesto van Hoff en la teoría iónica de soluciones. Planck aceptaba este reconocimiento un poco renuente, le interesaba cómo este modelo, particularmente –dado que él realizaba en ese momento trabajos en química sobre mezcla de gases–, y la teoría cinética de los gases estaban sustentados por el *principio de conservación de la energía*; sin embargo le quitaba el carácter de principio absoluto a la segunda ley. Planck consideraba que la unificación de la física debía estar dada en cuanto los conceptos de energía y entropía tejían la imagen del mundo mecánico. Es decir, a pesar de la incompatibilidad que encontraba con este esquema mecanicista, pensaba en la posibilidad “de una sustentación mecánica del principio de entropía” (Heilbron, 1986:18).

La oposición que encontró Planck frente a esta perspectiva se puede reseñar desde las implicaciones que tuvieron los trabajos de Maxwell y Boltzmann en la definición de la entropía, específicamente en la definición de la segunda ley de la termodinámica como un absoluto. Puesto que, ubicados en la concepción atomista de

²⁷ Los atomistas consideraban la definición del estado de movimiento de las moléculas o átomos que constituían las sustancias para explicar el comportamiento macroscópico.

la naturaleza, admitían la segunda ley como principio absoluto, sin embargo en su esfuerzo por explicarlo reducían la entropía a la acción de un ser especial, conocido como “diablillo de Maxwell”, o a una ley de probabilidades, en el caso de Boltzmann, dejando al segundo principio de la termodinámica sin validez para ser un principio que rigiera el comportamiento de cualquier otro proceso.

Por un lado, la idea de un ser pequeño que clasificara las partículas según su velocidad para explicar que el calor fluye de un cuerpo frío a otro caliente, despoja al segundo principio de la posibilidad de definir procesos reversibles e irreversibles y a su vez despoja a la entropía de su carácter de independencia frente a las consideraciones del hombre; era el científico quien le asignaba las características a ese ser para explicar lo que se observaba de manera macroscópica. Por otro lado, la consideración estadística de Boltzmann, que definía la entropía en términos de la probabilidad que un sistema se encuentre en un estado macroscópico al considerar los microestados de las moléculas que conforman el sistema (Olalla, 2006:46), indicaban dos cosas, la primera, que la segunda ley “estaba sujeta a excepciones” (Planck, 1958:232) en tanto dependía de la definición de los microestados. Y la segunda, que no era posible determinar la dirección en que evoluciona un sistema.

Es necesario ampliar las consecuencias de las consideraciones estadísticas, porque la manera como se significa la probabilidad en esta perspectiva entra en tensión con la idea de absoluto en el trabajo de Planck. Como se había mencionado en páginas atrás, la posición de Planck frente a los modelos mecanicistas que usan la reducción de los fenómenos al comportamiento mecánico de las moléculas que lo componen, como en el caso de la teoría cinética de los gases, dejaba abierta la posibilidad de que un número amplio de modelos mecánicos fueran elaborados según el proceso físico que se estuviera estudiando. Y es precisamente el mismo argumento que usa para cuestionar la mirada estadística de la entropía. Una de las dificultades a las que se enfrentó Boltzmann para justificar su trabajo fue la posibilidad que cada molécula tuviera varios estados (o microestados), en tanto que los datos que se obtenían eran promedios, y dentro de esa posibilidad cabían procesos reversibles como irreversibles.

En una carta enviada a Leo Graetz en 1897, de la que se hizo mención al inicio del capítulo, Planck realizó el siguiente comentario que muestra la reacción que tuvo frente al recurso de la probabilidad en la definición de la entropía:

¿Cómo puede ser que la magnitud de [la dirección de los procesos, la entropía,] tenga en todas las condiciones un valor enteramente determinado? (...) dado un estado (inicial) improbable, no puede servir para calcular el siguiente (...) El mantener que en la naturaleza el cambio siempre procede de (estados de) *probabilidad más baja a probabilidad más alta* carecería totalmente de fundamento. (Kuhn, 1980:47)

Volviendo a la consecuencia de estas concepciones que llevan a definir los procesos considerados irreversibles como reversibles, de acuerdo a las atribuciones que se dan al “diablillo” o al estado que se asigna a cada molécula de un sistema, es, según Planck, el derrumbe del edificio de la segunda ley de la termodinámica:

Puede ser demostrado (...) que si, en una sola instancia, uno de los procesos declarado irreversible (...) es encontrado reversible, entonces todos los demás procesos deben ser reversibles en todos los casos. Consecuentemente, todos o ninguno de estos procesos son irreversibles. No hay una tercera posibilidad. [Si esto ocurre] el edificio de la segunda ley se derrumbaría. Ninguna de las numerosas relaciones deducidas desde ésta, por más que muchas hayan sido verificadas por la experiencia, podrían ser consideradas como universalmente probadas. (...) Por otra parte, cualquier confirmación de [un hecho irreversible] soporta la estructura completa, y permite deducciones, aun en regiones aparentemente remotas, del significado completo que suministra la segunda ley. (Planck, 1945:86).

En este sentido, no es posible admitir imágenes de la naturaleza que pongan en duda un principio absoluto. Si se quería confirmar el carácter absoluto del aumento de entropía en los procesos irreversibles, era necesario extenderlo a los diferentes modos en que se realizaban procesos de transformación de la energía, así se daría el sustento al segundo principio de la termodinámica.

Con lo expuesto hasta el momento, el significado que tiene la palabra principio debe vincularse, por un lado, a la idea de jerarquización en el conocimiento de la naturaleza, así el objetivo de Planck de definir el aumento de entropía como un absoluto, implicaría siguiendo a Nicol (1965:294), no dar nada por supuesto, ni considerar ninguna verdad anterior, ya que “todas las verdades se fundan en la del principio”, como la clasificación de los procesos de la naturaleza.

Por otro lado, los principios racionales que guían el trabajo de Planck, según la definición dada por Bachelard, son principios de experiencia. Experiencia en tanto a la carga teórica, “que no pertenece a la naturaleza natural sino que se constituye racionalmente” (Bachelard, 2005:89). Y además define una lógica que guía la acción del científico. Los principios de experiencia dependerán de la función que cumplen dentro de la explicación y si hay objeciones está abierta la posibilidad de trabajar desde otra lógica; por eso tiene cabida plantear una tensión entre lo absoluto y la probabilidad, en tanto que la búsqueda de los absolutos, como principio de experiencia, abrió la posibilidad de englobar la mirada microscópica y macroscópica en la entropía.²⁸

1.3 Una nueva solución a un problema anterior: los absolutos y la probabilidad

Dado el interés que tenía Planck por la definición de la segunda ley de la termodinámica como un principio absoluto, en la última década del siglo XIX, acepta un problema dentro de la física, tanto experimental como teórica, que no había podido ser resuelto: determinar la distribución de radiación de un cuerpo que absorbe la totalidad de radiación que incida sobre él y que de la misma manera emite toda la radiación que produzca, como se ha mencionado a lo largo del escrito: la radiación de cuerpo negro.

Determinar la segunda ley de la termodinámica en este fenómeno, de interacción entre radiación y materia, sería la manera de demostrar su carácter absoluto y de reconciliarla con la visión mecánica de la naturaleza. Sin embargo al responder a estos intereses, como se mencionó en la primera parte de este capítulo, Planck resolvió las inquietudes de la comunidad científica del momento y, al mismo tiempo, evidenció la necesidad de hacer consideraciones que no estaban dentro de la física.²⁹ A pesar de

²⁸ Al respecto Bachelard (2005:31) cuestiona: “¿es posible hacer una lógica que englobe a las dos físicas del objeto cualquiera: la física del macroobjeto cualquiera y la física del microobjeto cualquiera?”, pensar en una respuesta afirmativa, según Bachelard, sería quitar énfasis a los principios como estructura y considerarlos en su función. Precisamente Planck encuentra esa lógica desde la tensión.

²⁹ Estas consideraciones son las correspondientes a la cuantización de la energía, que precisamente se atribuyen a Planck en su obra de 1900 sobre la teoría de la radiación de calor. Aunque como señala Kuhn

que la física de finales del siglo XIX se presentaba como una estructura completa y perfecta, Planck mostró que había grietas que no permitían articular ciertas partes de la realidad con las leyes que brindaban una imagen de la naturaleza.

Planck planteó (1961:44) que las grietas en la estructura de la física fueron las que posibilitaron un movimiento creador dentro de la comunidad científica que “produjo la más importante expansión que la física teórica [había] experimentado desde los tiempos de Newton”. Precisamente Planck es uno de los científicos que perteneció a ese movimiento creador, pues se encontró con una de las grietas: el problema del cuerpo negro. ¿Qué implicaciones trajo esto al trabajo de Planck como investigador? Este terreno inconsistente de la física es donde, en el acto de explicación realizado por Planck, se plantea la tensión que experimentó en los principios racionales que guiaban su investigación.

Para Sánchez Ron (2005:12) el trabajo que había realizado Planck hasta 1900 dejaba de lado mecanismos que subyacieran a los principios de la termodinámica y se centraba en el ámbito fenomenológico en el que dichos principios se cumplían universalmente. “Así (...) una de las dificultades que tuvo que vencer para llegar [a la solución del problema de distribución de energía] fue aceptar la interpretación (estadística, probabilística) de Boltzmann”. El problema del cuerpo negro sería entonces el escenario para que Planck pusiera en tensión dos principios racionales que hasta el momento no habían entrado en confrontación necesaria dentro de la explicación de un fenómeno: lo absoluto y la probabilidad.

Con el fin de encontrar elementos que caracterizan la tensión entre absoluto y probabilidad, se presenta a continuación la manera como fue planteado y abordado el problema de cuerpo negro.

(1980:13) a mediados de 1906 no era posible encontrar en la obra de Planck ni restricciones sobre la energía clásicamente permisible, ni discontinuidades en los procesos de emisión o absorción”.

1.3.1 La radiación de cuerpo negro

El problema del cuerpo negro fue planteado desde mediados del siglo XIX, pero sólo hasta finales de siglo salió de los laboratorios de los físicos para pasar a ser una investigación importante para el desarrollo de la industria nacional. El primero en dar la denominación *cuerpo negro* fue uno de los maestros de Planck en Berlín, el físico alemán Kirchhoff,³⁰ quien en medio de sus estudios sobre espectroscopía se dio a la tarea de investigar cómo es que se da la interacción entre la radiación y la materia.

Se reconoce que desde 1800 se realizaron estudios sobre radiación, fue precisamente en ese año que William Herschel observó dos aspectos que caracterizan el espectro solar y que definieron el problema que implicaba la descripción de la radiación. Por una parte, descubrió que dicho espectro además de estar conformado por una franja visible (en la que se perciben colores del violeta al rojo) también contaba con una no visibles, correspondiente a los rayos infrarrojos. Por otra parte, encontró que el calor estaba distribuido heterogéneamente en el espectro, siendo mayor en la zona por debajo del rojo. Entonces, señala James Murphy, determinar la manera como está relacionada la frecuencia de la radiación con la temperatura, en otras palabras determinar una ecuación que diera cuenta de la distribución espectral de la radiación para diferentes temperaturas, se configuró en un problema de interés para los físicos (en: Planck, 1961:25).

Con este antecedente, Kirchhoff se centra en el estudio de la radiación de cuerpos. Encontró que un cuerpo caliente emite rayos de calor, cuya intensidad depende de la naturaleza y de la temperatura del cuerpo; si un cuerpo pierde calor en proporción al que radia su temperatura disminuye; en caso de que exista equilibrio térmico entre varios cuerpos en un mismo recinto habrá una compensación entre la radiación que emite cada cuerpo con la que absorbe de los demás. De esto, que parecería obvio, Kirchhoff demostró que “éste estado de equilibrio es único y corresponde a una composición espectral perfectamente determinada de la radiación encerrada en el recinto” (De Broglie, 1965:92).

³⁰ Fue en 1860 frente a la Sociedad de Historia Natural de Heidelberg que Kirchhoff dio la definición de cuerpo negro.

Un cuerpo negro sería aquel que, sin importar su forma, absorbe todos los rayos que caen en él, o cuya capacidad de absorción es igual a la unidad.³¹ Kirchhoff encontró que la cantidad de energía radiada respecto a una longitud de onda es constante y correspondería a una composición espectral que representa el continuo de la radiación, o por lo menos en cierto rango de longitudes de onda de acuerdo a la temperatura del cuerpo. Con esto planteó que la relación entre las cantidades de energía radiada y absorbida no depende de los cuerpos, únicamente dependerá de la longitud de onda de la radiación y la temperatura de equilibrio (Kuhn, 1980:23).

Pero ¿qué valor debía tener esa constante? ¿Cuál es la dependencia que tiene con la temperatura del cuerpo y la radiación? Justamente estas son las preguntas que darían paso a una larga investigación que debió integrar la teoría termodinámica –que contaba con las leyes de conservación de la energía y con la ley del aumento de entropía– y la teoría electromagnética –que para el momento contaba con los estudios de Hertz quien supuso que tanto la radiación visible como la térmica eran ondas electromagnéticas gobernadas por las leyes de Maxwell–, y obligó a pensar en la manera de construir en el laboratorio un *cuerpo negro*.³²

Sin tener noción de los resultados que emergerían del problema del cuerpo negro al finalizar el siglo XIX, en la década de los sesenta éste tuvo implicaciones importantes en la física teórica y experimental: relacionar dos fenómenos desvinculados: la radiación y el calor; y reconocer la existencia de una constante que dejaba por fuera cualquier intento de hipótesis especial sobre la constitución de los cuerpos, esto con el trabajo de Kirchhoff.

Según Heilbron (1986:6) la motivación de Planck por investigar en este campo estuvo justificada por dos razones diferentes, una correspondía a su interés por los

³¹ Planck caracteriza de la siguiente manera un cuerpo negro: primero, debe tener una superficie negra para que se absorban los rayos incidentes sin reflexión. La propiedad de ser negro no sólo depende de la naturaleza del cuerpo sino también del medio contiguo. Segundo, el cuerpo negro debe tener un mínimo de espesor dependiendo de su poder de absorción, esto asegura que los rayos después de pasar al cuerpo no pueden salir por ningún punto de la superficie. Tercero, el cuerpo negro debe tener un coeficiente de dispersión muy pequeño. (Planck, 1914:10)

³² Fueron preguntas de tal talante que según Sánchez Ron (2005:30) “si se conocía la forma que tenía esta constante, una vez se midiese (...) la radiación emitida por una estrella, por ejemplo, se podría calcular (...) la temperatura de la superficie de la estrella”.

absolutos y la otra el valor técnico que tendría en la industria, promovido por el PTR.³³ Sin embargo, como se lee en la carta que Planck le envía a su amigo Graetz, su principal interés respondía a la búsqueda de los absolutos en la naturaleza. Y determinar la distribución de energía significaba encontrar una relación independiente de cuerpos y sustancias especiales, que necesariamente conservaría su importancia en el tiempo y las culturas. En su autobiografía académica lo expresa de la siguiente manera:

Esta llamada distribución normal de la energía espectral [que hasta el momento se ha denominado como energía radiada] representa algo absoluto y, como siempre consideré la búsqueda de lo absoluto como el más grandioso objetivo de toda actividad científica, me puse a trabajar afanosamente. Descubrí un método directo para resolver el problema en la aplicación de la teoría electromagnética de la luz, de Maxwell. (Planck, 1958:239)

Antes de que Planck se dedicara a estudiar el cuerpo negro, en las últimas décadas del siglo y de manera prolíferamente en los noventa, se destacaron los trabajos de físicos experimentales y teóricos que desde la termodinámica abordaron el problema. Los más reconocidos son: Josef Stefan, que para 1879, con datos experimentales propuso una ley de la emisión de radiación; Ludwig Boltzmann, quien dio las bases teóricas de la ley de Stefan, cinco años después de su formulación; Wilhem Wien, físico investigador del PTR, quien entre 1890 y 1896 enunció una ley que involucra la temperatura del cuerpo y la longitud de onda radiada. Entre 1895 y 1896, Planck presentó ante la Academia de Ciencias de Berlín sus primeras aproximaciones al problema. A diferencia de las propuestas de sus colegas, como lo señala en su autobiografía, empleó el electromagnetismo como un paso preliminar al problema del cuerpo negro.

Las primeras aproximaciones, basadas sobre principios de la termodinámica, no resolvieron completamente el problema. Puesto que la función que daba cuenta de la distribución de radiación no quedaba totalmente definida. Como lo expresa De Broglie (1965:93), era “necesario introducir una hipótesis sobre la manera como la materia emite y absorbe la radiación”, dando paso a la teoría electromagnética, que ofrecía mecanismos de emisión y absorción de la radiación. Este enfoque, que ya venía siendo

³³ Por su parte Del Rio (2010:113) afirma que la principal motivación de Planck al abordar el problema del cuerpo negro era “dar sustento microscópico a la segunda ley de la termodinámica, en particular encontrar una conexión entre las ecuaciones de Maxwell y la termodinámica de la radiación”.

trabajado por Planck, lo utilizó el físico inglés John Strutt, tercer Barón Rayleigh, quien lo sintetizó en la conocida *ley de Rayleigh*.

Mientras tanto el trabajo en los laboratorios del PTR arrojaba datos cada vez más refinados, las medidas obtenidas por Otto Lummer, Ernst Pringsheim, Heinrich Rubens y Ferdinand Kurlbaum indicaban que la relación entre la energía radiada y la longitud de onda a una temperatura dada se correspondían con una gráfica en forma de campana. Con esto se pusieron a prueba los resultados teóricos, así la *ley de Wien* y la *ley de Rayleigh* fueron cuestionadas, pues sólo se cumplía para longitudes de onda pequeñas. Fue en este momento –octubre de 1899–, que Rubens se puso en contacto con Planck informándole de los últimos datos. Comienza así el trabajo arduo de este físico que, para diciembre del mismo año, daría solución al problema que llevaba cuarenta años sin ser resuelto (Sánchez, 2005:128).

De manera resumida, se puede afirmar que el trabajo de Planck estuvo dividido en tres etapas: La primera corresponde al análisis previo basado en la teoría electromagnética de Maxwell; la segunda es un retorno a la termodinámica, debido a que busca la definición del proceso de absorción y emisión de radiación como irreversibles; y la tercera se refiere a establecer la relación entre entropía y probabilidad para dar sentido físico a los resultados que había obtenido hasta el momento. Estas fases las hace explícitas en los cinco artículos expuestos ante la Academia Prusiana, titulados *Sobre los procesos de radiación irreversible*, y en su libro escrito durante 1906 y 1907, *La teoría de la radiación de calor*.³⁴

En la primera fase del trabajo, Planck planteó un modelo que podía explicar la interacción entre el cuerpo y la radiación, considerando la interacción entre osciladores³⁵ –que podrían componer el cuerpo, legitimado por la *ley de Kirchhoff*– y ondas electromagnéticas. El problema tuvo como centro describir el comportamiento

³⁴ Para este año, se habían resuelto varias inquietudes que quedaron abiertas en las primeras entregas del trabajo que se concluyó en 1900 y que fueron base para el trabajo presentado en 1918 por Albert Einstein sobre la cuantización de la energía. Y aunque para Planck la idea del *cuanto* aún era una hipótesis, ya admitía la visión atomista y probabilística como necesaria en la explicación de los fenómenos físicos.

³⁵ “Los resonadores son entidades imaginarias, de estructura no especificada (...). El problema del cuerpo negro versaba, tanto teórica como experimentalmente sobre campos, no resonadores, y era por tanto a campos a los que Planck tenía que extender su trabajo” (Kuhn, 1980:57)

de campos electromagnéticos.³⁶ Como ya se había señalado y de acuerdo con, Heilbron (1986:14), Planck encontraba la concepción atómica de la materia irreconciliable con el principio de incremento de entropía y optaba por una consideración desde la mecánica del continuo; razón por la que optó por los campos y no por los átomos. Así, lo expuso en el primero de los artículos:

Supuse que la cavidad [del cuerpo negro] estaba llena de osciladores lineales simples o resonadores, sujetos a pequeñas fuerzas amortiguadoras y teniendo períodos diferentes; y esperaba que el intercambio de energía causado por la radiación recíproca de los osciladores diera lugar, con el tiempo, a un estado estacionario [estado de equilibrio] de la distribución normal de energía correspondiente a ley de Kirchhoff. (Planck, 1958:239)

Fuera del desarrollo teórico y matemático de la consideración de este modelo de explicación, desde el cual consiguió calcular la relación entre la radiación absorbida y emitida por el cuerpo y encontrar la dependencia de la longitud de onda (Kuhn, 1980:55) tal como lo habían planteado Kirchhoff, Wien y Rayleigh, se encuentra a la base la intención de describir un proceso en el que la segunda ley de la termodinámica se cumple satisfactoriamente, donde el proceso pueda ser concebido como irreversible.

La cuestión de la irreversibilidad no fue resuelta desde este abordaje, pues así como la descripción de la segunda ley descrita por Clausius partía de la consideración de procesos reversibles, las leyes de Maxwell para los campos eran invariantes frente a la inversión del tiempo, es decir concebía los procesos electromagnéticos como reversibles. Es así como Boltzmann refuta el trabajo presentado por Planck: “cualquier unidireccionalidad que el señor Planck encuentre en el efecto de los resonadores ha de provenir por tanto, de haber elegido condiciones iniciales unidireccionales” (Boltzmann en: Olalla, 2006:51). En otro momento sugiere que:

Al igual que se ha hecho en la teoría de los gases, también se podría determinar el estado más probable de la radiación; o más adecuadamente, una regla general que englobase todo el conjunto de los muchos estados en los que las ondas no están ordenadas de ninguna forma. (Boltzmann en: Sánchez, 2005:132)

³⁶ Si es de interés conocer el detalle de este trabajo se recomienda la siguiente bibliografía: Kuhn, T. (1980), *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica 1894-1912*, Alianza, España. Sánchez Ron (2005), *Historia de la física cuántica, Vol.1 el periodo fundacional* Segunda edición, Crítica, España.

Con estas palabras Boltzmann alude la necesidad de considerar el problema desde una mirada estadística, le sugiere a Planck que la condición inicial unidireccional de la radiación, o hipótesis de la radiación natural, se corresponde con la hipótesis del caos molecular en el comportamiento de los gases.

En este contexto se ubica la segunda fase del trabajo de Planck. Como respuesta a Boltzmann, en el tercer artículo, se da a la tarea de encontrar la manera de justificar los procesos de radiación como irreversibles. Y la mejor manera fue volviendo sobre el terreno que más interés había generado en él, la termodinámica. Por lo que optó por encontrar la relación entre la entropía del oscilador con su energía, y no como lo habían planteado sus colegas, la relación entre la temperatura y la energía del cuerpo (Planck, 1958:241).

A pesar de que Planck reconoció las observaciones de Boltzmann, no aceptó la probabilidad dentro de la explicación física, pero sí la hipótesis de la radiación natural. Lo expresa en el cuarto artículo, de la siguiente manera:

Es necesario excluir de una vez para siempre, mediante estipulación positiva previa, todos los procesos de radiación que no exhiban la característica de irreversibilidad (...) Esto lo efectuaremos (...) introduciendo el concepto de radiación natural. (Planck en: Kuhn, 1980:102)

Con esto no se pone en duda que el proceso de radiación es irreversible. Se considera que lo más probable –sencillo y lógico– es que no exista un estado específico y regular en el campo al iniciar el proceso de absorción o emisión de radiación, no hay manera de determinar un *orden* en las constantes de fase de la radiación, por lo que tampoco se puede conocer cómo es la interacción entre las ondas. Así, lo único que se puede asegurar, de acuerdo a los datos experimentales, es que a medida que se acerca el cuerpo negro a un estado de equilibrio, la intensidad de radiación varía monótonamente. Continúa Planck en el mismo artículo:

El síntoma más directo de la irreversibilidad de un proceso es la exhibición de una función que está completamente determinada por el estado instantáneo del sistema y que posee la característica de que cambia en una sola dirección (...) elegimos una [función] que es especialmente sencilla. Por analogía con la función termodinámica de Clausius la llamaremos la entropía del sistema constituido por una cavidad esférica y un resonador. (Planck en: Kuhn, 1980:109)

En este punto Planck no sólo admitió una hipótesis especial –la radiación natural– sino que también dio paso a la mirada estadística. Como lo presenta Del Río (2010:121), para 1898 los conceptos empleados por Planck se parecen cada vez más a los de Boltzmann y se convence que es imposible la explicación desde una postura que no sea estadística. Es así como para 1900 realiza la presentación del quinto artículo en el que expone el proceso algorítmico que lleva a la función de la distribución de radiación en términos de la frecuencia de la radiación, la temperatura del cuerpo y una constante universal, la conocida *constante de Planck* (h).

El mismo día de la presentación de Planck se compararon los datos experimentales con los datos teóricos y los físicos del PTR dieron validez a la ecuación. Así se resolvía el problema del cuerpo negro, pero se abría la puerta a un campo no conocido por los físicos, pues la constante que Planck incluyó implicaba que el carácter de la energía no era continuo, sino que en interacción con la materia se comportaba de manera discontinua, en paquetes, ello dio origen al *cuanto de acción*.

Las consecuencias que emergieron de ese trabajo en la física no estaban claras para Planck, como él mismo lo comenta en una carta a su colega Robert Williams Wood (en: Sánchez, 2007:347) fue un *acto de desesperación* el que lo llevó a estos resultados *formales*. Empieza entonces la tercera fase de su trabajo, dar sentido físico al resultado obtenido:

Aunque la validez absolutamente precisa de la fórmula de la radiación quedara verificada, mientras tuviera meramente el crédito de ser una ley descubierta por una afortunada intuición, no se podría esperar que poseyera algo más que un significado formal. Por esta razón, el mismo día en que formulé dicha ley me dediqué a investigar su verdadero significado físico, lo cual me llevó automáticamente al estudio de la interacción de la entropía con la probabilidad. (Planck, 1958:242)

Como afirma Del Río (2001:108), si Planck encontraba que la definición probabilística de la entropía, dada por Boltzmann para los gases, era válida para la radiación, implicaba que la energía de los osciladores estaba cuantizada, lo cual no era fácil de entender para un físico conservador como él. Así mismo Del Río afirma: “Planck no toma conciencia en ese momento” que el método probabilístico que usó difiere al de Boltzmann y es precisamente el que fue utilizado inicialmente por quienes desarrollaron la posición probabilística de la mecánica cuántica.

Por otra parte se destaca el trabajo físico matemático empleado en la segunda y tercera fase del trabajo de Planck. Se destaca la técnica del “cuchareo, o de solución inversa” como el recurso al que acudió para encontrar que el principio de aumento de entropía también se cumplía en los procesos de absorción y emisión de radiación. Esta técnica consistía en ajustar las hipótesis para llegar a los resultados esperados.³⁷

Aunque este análisis físico teórico resulta muy interesante no se hará más énfasis en él. Se destaca que es precisamente en la última fase en la que se encuentra la tensión entre los principios racionales que orientaban el trabajo de Planck y del que se hará análisis en el siguiente capítulo.

³⁷ En los artículos de Del Río titulados: “Los trabajos originales de Planck” (2001) y “Planck y la radiación” (2010), se encuentra una descripción general de este procedimiento algorítmico.

CAPÍTULO 2. LA TENSION DENTRO DE LA ACTIVIDAD CIENTÍFICA DE PLANCK

El hombre que no puede imaginar sucesos y condiciones de existencia contrarios al principio causal que él conoce, jamás enriquecerá su ciencia con la adición de una nueva idea.

Max Planck

La ciencia es histórica porque contiene un elemento de creación que está sometido a un orden dialéctico, en tanto depende de los fenómenos que fueron base para su formulación y de la evolución en el pensamiento teórico del científico (Nicol, 1965:40). De esta definición que presenta Nicol se rescatan para el desarrollo de este capítulo dos aspectos; por un lado, la historicidad de la ciencia y, por otro, el orden dialéctico en la creación, por ser éstos los que permiten hacer un análisis de la tensión entre los principios racionales que guían el trabajo de Planck.

La historicidad de la ciencia, según la define Nicol, no se da fuera de la actividad de la persona que está indagando sobre un problema científico, sino que por el contrario existe en tanto el científico tiene una carga de verdades teóricas que conoce y de los principios de la ciencia desde los que inicia su abordaje. Precisamente, cuando Planck se da a la tarea de proporcionar sentido físico a las consideraciones y procedimientos a los que acudió para resolver el problema del cuerpo negro, tiene la necesidad de dar una explicación que se enmarque en el campo de la termodinámica o de la electrodinámica y que no se contradiga con los absolutos que hay en la naturaleza, que se encuentran expresados en cualquier campo de la ciencia.

Planck (1961:187) reconoce esta necesidad histórica afirmando que el científico no sólo debe mirar hacia adelante con la intención de averiguar si una hipótesis puede ser aplicada en otras direcciones, también debe mirar hacia atrás. Y es precisamente en esa mirada hacia los fundamentos de la física que Planck se ubica en el problema del cuerpo negro y busca definir el aumento de entropía como un principio absoluto. Lo que le obliga a reconocer el trabajo que otros científicos habían realizado y con los que

no estuvo de acuerdo, como el de Clausius y el de Kirchhoff que desde el mecanicismo explicaban los fenómenos térmicos y electromagnéticos, así como reconocer los fundamentos del trabajo de quienes en el momento estaban aportando en el mismo campo, como Boltzmann, pero que de igual manera se contradecían con su forma de entender el comportamiento de la naturaleza.

La historicidad no sólo se reconoce en la dirección del pasado al presente, sino que tiene una repercusión en el futuro, en tanto que el pensamiento teórico, que menciona Nicol, o el razonamiento constructivo, que considera Planck debe tener el científico,³⁸ es dinámico, tiene un carácter evolutivo que se reconoce en las maneras de entender el mundo –el mundo físico para Planck– y obliga a realizar un tipo determinado de explicación. Kuhn (1980:51) afirma que durante los primeros años de investigación, que Planck realizó sobre el cuerpo negro, la teoría electromagnética le permitió describir el comportamiento continuo de la interacción entre radiación y materia, pero ya en 1900 sus escritos reflejaban la necesidad de cambiar de perspectiva, lo que involucraba los fundamentos mismos del fenómeno; pero este cambio “no desempeñó ningún papel visible en el pensamiento de Planck hasta principios del siglo XX”, es decir unos años después, cuando logra dar sentido físico a su formulación.

En el carácter de historicidad necesariamente se debe reconocer el orden dialéctico de la actividad científica. La actividad que realiza Planck para encontrar un sentido físico a la expresión matemática que define la entropía, muestra cómo es necesario ubicarse en el medio de dos formas distintas de ver el comportamiento de la naturaleza: la explicación macroscópica, desde la que él abordaba los fenómenos físicos, y la explicación microscópica, que ya había sido abordada por otros, que el mismo Planck había leído y criticado.³⁹

³⁸ “La ciencia, en general, se presenta ante nosotros con el aspecto de una maravillosa estructura teórica, que es uno de los frutos más espléndidos del razonamiento constructivo” (Planck, 1961:68)

³⁹ En 1894 Planck publicó el tercer volumen del tratado de Clausius, en el que se abordaba la teoría cinética de los gases. También para ese año, editó el tercer volumen de las lecciones de Kirchhoff sobre la electricidad y magnetismo. En 1896 realiza la demostración sobre la distribución de Maxwell ante la Academia Bávara de Ciencias. Conocía el trabajo realizado por Boltzmann y por Maxwell sobre la teoría cinética.

Aunque en este trabajo no se realiza un análisis en términos del orden dialéctico del trabajo de Planck, sí se encuentra como una característica determinante la tensión que soportaron sus ideas sobre el mundo físico, al enfrentar lo absoluto y la probabilidad en la definición de la entropía. Y que corresponderían con el periodo de difícil gestación de las hipótesis científicas, que Planck considera como parte fundamental dentro del desarrollo de las teorías que manejan los científicos:

Todas las hipótesis de la ciencia física tienen que pasar por un periodo de difícil gestación antes de que puedan ver la luz del día y pasar a las manos de los otros investigadores en forma científica. (Planck, 1961:186).

2.1 La entropía como vínculo entre lo absoluto y lo probable

Con el fin de definir los aspectos que caracterizan la tensión entre absoluto y probabilidad, se deben reconocer las consideraciones que Planck tuvo en cuenta para dar sentido físico a la definición probabilística de la entropía, realizada por Boltzmann, en la explicación de la distribución de radiación de cuerpo negro. Estas consistieron, por un lado, en definir el comportamiento microscópico de la materia y de la radiación, que dio cabida a la admisión de hipótesis especiales que inicialmente rechazaba. Y por otro, la admisión de la probabilidad termodinámica para definir la entropía sin que este concepto perdiera el valor que tiene como *absoluto* en la explicación. Estos dos aspectos permiten ubicar la definición de la entropía como el centro de la tensión.

Cuando Planck presenta el problema de involucrar la probabilidad como un instrumento de cálculo en las ecuaciones que dan cuenta del estado electrodinámico del cuerpo negro, se encuentra implícitamente una de las fuerzas que genera la tensión: el *carácter universal* de las leyes físicas:

A primera vista podríamos, de hecho, estar inclinados a pensar que en una teoría puramente electrodinámica no habría espacio en absoluto para los cálculos de probabilidad. Pues ya que como es bien sabido, las ecuaciones del campo electrodinámico junto con las condiciones iniciales y de frontera determinan de manera única la forma en que un proceso de electrodinámica se lleva a cabo, en el transcurso del tiempo. (Planck, 1914:113)

De la misma manera, Planck (1960:16) plantea en: *La unidad del universo físico*, publicado en 1908, que aceptar el método estadístico implica muchos sacrificios. Uno de ellos sería negar “la respuesta completa a todas las preguntas relativas a los detalles de las operaciones físicas”.

Como ya se ha expuesto, Planck hace un abordaje del problema del cuerpo negro involucrando las leyes de la electrodinámica y de la termodinámica, porque son éstas las que permiten hacer una descripción detallada de los procesos que involucran la radiación y la temperatura. Por ser leyes tienen un carácter universal, hacen parte de la estructura teórica de la ciencia, que va más allá de un complejo de experiencias individuales debido a que involucran el razonamiento constructivo⁴⁰ de los científicos (Planck, 1961:68), razonamiento que se ubica en el mecanicismo como la forma de comprender los fenómenos naturales.

Otro de los sacrificios sería sumar, a la relación causal de *necesidad absoluta* entre estados físicos de un sistema, un tipo de relación causal de *simple probabilidad* de la interdependencia entre estados (Planck, 1960:16). Esto último significaría que *no es absolutamente necesario* una direccionalidad de los procesos en la naturaleza, sino que existe un grado de *probabilidad* que un proceso irreversible sea reversible.

Es en este sentido que Boltzmann admitió la probabilidad en la descripción de los fenómenos ocurridos en los gases. Consideraba que la naturaleza probabilística de las leyes, como la segunda ley de la termodinámica, implicaba que éstas eran casi siempre válidas, por lo que podían existir situaciones en las que no se cumplían (Del Río, 2007:192). Esto indica la existencia de un rango de posibilidades en el comportamiento de la naturaleza, negando el seguimiento de los procesos en el tiempo. Así que dar cabida a la probabilidad, en la descripción de los fenómenos naturales, significaba quitarle el carácter universal a las leyes, o en cuanto a la entropía quitarle el carácter de absoluto.

⁴⁰ Planck no admite la posición de los positivistas por esto le da mucho peso al ejercicio de razonamiento del científico sobre la experiencia que pueda tener: “se comprende que sobre la base de un mero complejo individual de experiencias, el individuo más inteligente sería incapaz de construir un sistema científico comprensivo”. (Planck, 1961:79)

Lo cual implica que la definición probabilística de la entropía, supera el significado algorítmico de la estadística y la probabilidad, no puede ser considerada como una mera herramienta matemática, como lo expresa Planck, que se acomoda a los resultados experimentales o a los datos que arroje otra teoría. La inclusión del cálculo de probabilidades implica una manera de considerar la explicación de los fenómenos físicos, un principio racional.

Para que quede definida la tensión es necesario que exista una fuerza que haga contrapeso al *carácter universal y absoluto* de las leyes. Ésta es el *carácter no antropomórfico de la entropía* que definió Boltzmann,⁴¹ porque dejaba de lado métodos experimentales sensoriales o pensados y se le asignaba al comportamiento de los procesos naturales el centro de la explicación: “todos los procesos naturales tienden a la formación de estados de mayor probabilidad”. Claro, esto implicaba para Planck la introducción de la teoría atómica y del método estadístico en la explicación del mundo físico (Planck, 1960:15).

Kuhn (1980:59) señala que en la investigación de Planck se identificaron tres conjuntos de ideas que surgen de la teoría cinética de la irreversibilidad, trabajada por Boltzmann a finales del siglo XIX, y que dan muestra del carácter des-antropomórfico de la formulación estadística de la entropía. Uno es el *teorema H*, el cual formula que un gas tiende a evolucionar hacia el equilibrio a partir de un estado inicial arbitrario. Esto queda descrito desde una función *–la función H–* que da cuenta de la manera como la distribución de velocidades de las moléculas, que componen el gas, cambia en el tiempo.

El segundo conjunto corresponde al tratamiento estadístico o combinatorio de la irreversibilidad. Resumiendo todo el proceso matemático que implicó para Boltzmann el recurso de las leyes de la probabilidad,⁴² escribe en 1877:

⁴¹ Heilbron (1986:29) al respecto señala que Planck encontró en la formulación estadística de Boltzmann un método para desantropomorfizar el concepto de entropía, puesto que desde el análisis termodinámico tradicional los experimentos mentales eran los que se habían puesto en juego, dejando a la segunda ley sin sustento para ser considerada como un principio real.

⁴² En *la herencia estadística de Planck: Boltzmann sobre la irreversibilidad*, capítulo 2 del libro de Thomas Kuhn titulado “*La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica, 1894-1912*”, se encuentra una descripción completa del desarrollo teórico matemático realizado por Boltzmann.

Considérese un sistema arbitrario de cuerpos que experimentan un cambio arbitrario entre estados, no necesariamente caracterizados por el equilibrio; la medida total de permutabilidad de todos los cuerpos aumentará entonces continuamente durante el cambio de estado, y a lo sumo permanecerá constante si a lo largo de la transformación todos los cuerpos se aproximan infinitamente al equilibrio térmico (un cambio de estado reversible). (Boltzmann en: Kuhn, 1980:74)

La permutabilidad tiene un papel importante dentro del tratamiento matemático que Boltzmann desarrolló para definir la *función H*. Ésta no distingue ni el estado mecánico de cada molécula ni cada interacción entre ellas, sino el resultado de su interacción en el estado del gas; por lo que da cuenta del proceso por el que pasa el gas. En este sentido la entropía, que explica la evolución de los procesos, queda definida por las leyes de la probabilidad, no así por el demonio de Maxwell o por procesos ideales inexistentes en la naturaleza. Sin embargo, para poder entender el resultado de interacciones que no pueden ser definidas una a una, Boltzmann debe recurrir a una hipótesis, el *desorden o caos molecular*, que es el tercer conjunto de ideas que considera Planck, y el que se analizará más adelante.

Hasta este punto, la tensión se ve marcada por dos factores contrarios: la descripción macroscópica de la naturaleza y la descripción microscópica. La primera implica que la descripción de los procesos se realiza a través de la medición de variables que dan cuenta del estado, ya sea termodinámico o electromagnético, de los cuerpos y de la manera como se desarrollan los procesos –su evolución en el tiempo–. Por otra parte en la descripción microscópica, a partir del estado mecánico de cada partícula o molécula que compone la sustancia, se define el comportamiento observable; esto en términos de las configuraciones más probables de las partículas.

Esto implica la existencia de consideraciones diferentes frente a la información que proporciona la magnitud de la entropía. Heilbron (1986:8) lo define de la siguiente manera: la formulación de Boltzmann, realizada desde la mirada mecanicista de la naturaleza, se apoyó sobre la proposición de que el equilibrio no es un estado final sino sólo la condición más probable. En otros términos, mientras desde la mirada macroscópica la entropía explica la posibilidad de los cambios de estado en la naturaleza, desde la otra perspectiva, la entropía es una medida de la probabilidad de las condiciones en las que se encuentran las partículas de la sustancia.

Admitiendo que el comportamiento de las partículas que conforman una sustancia determina los cambios observables, “las cantidades medidas termodinámicamente (...) representan sólo valores medios” de los movimientos de las partículas (Planck, 1914:114). Pero si por el otro lado, se considera que a partir de los datos obtenidos por la medición macroscópica de las magnitudes de estado es posible conocer el estado mecánico de las sustancias, se encontraría más de una configuración posible. En términos de la definición de la entropía, esto implica que su magnitud es un valor medio del estado de las partículas, o que si desde el punto de vista macroscópico se cumple la ley del aumento de entropía, es posible que el comportamiento mecánico de las partículas de las sustancias no necesariamente se ajuste a esta ley, lo que se convirtió en el problema a resolver por Planck.⁴³

Con esto se puede decir que la entropía estaba en el centro de la tensión, no sólo entre absoluto y probabilidad, sino entre miradas diferentes respecto al comportamiento de las sustancias, así como entre los procedimientos y herramientas para describirlo. Es una tensión por encontrar la manera de conciliar dos perspectivas contrarias de un mismo aspecto. La entropía es el límite que divide estas dos formas de ver la naturaleza y el que las comunica.

Siguiendo a Planck, la manera de solucionar el problema sería dar cabida a una hipótesis especial que permitiera que las teorías mecánica y electrodinámica pudieran describir el proceso y se cumpliera con las leyes de la termodinámica, especialmente con la segunda ley. Se debe recordar que Planck no concebía en la física hipótesis especiales, pues lo que el físico hacía al encontrar las leyes era una descripción de la naturaleza tal cual es, tal cual se le presenta; y plantear una hipótesis especial, ya sea de la constitución de la naturaleza o de las condiciones iniciales para que se dé un proceso físico, implica atribuir a la naturaleza cualidades que tal vez no tiene. Sin embargo llegó a un punto en el que los elementos teóricos con los que contaban no eran suficientes, pero por ello no dejaban de perder validez frente a la explicación. Al parecer lo que permitía que mantuvieran tal validez en cualquier campo explicativo, o

⁴³ En el primer capítulo, estas eran las ideas con las que Planck justificaba su rechazo a la definición probabilística planteada por Boltzmann, y son precisamente las ideas que debe conciliar con su manera de explicar la naturaleza, dado que hizo uso de la formulación probabilística de la entropía para resolver el problema del cuerpo negro.

mejor frente a la explicación de cualquier fenómeno de la naturaleza, era garantizar el cumplimiento de la conservación de la energía y del aumento de entropía.

En ese campo problemático, Planck se estaba enfrentando a un fenómeno (radiación de cuerpo negro) que, como muchos en la naturaleza, no puede ser enmarcado en una única teoría física, era necesario dar cuenta de un proceso termodinámico así como electrodinámico y que no contradijera a la posición mecanicista que hasta el momento imperaba para la explicación.

Por lo tanto, si no queremos renunciar por completo a la posibilidad de representar los procesos termodinámicos mecánica o electrodinámicamente, sólo queda una manera de salir de la dificultad, a saber, suplir las condiciones iniciales y de frontera por hipótesis especiales, de tal naturaleza que las ecuaciones de la mecánica o de la electrodinámica conduzcan a un resultado inequívoco de acuerdo con la experiencia. (Planck, 1914:115)

Hay entonces una única condición para aceptar la hipótesis, ésta debe ser puesta a prueba con los resultados experimentales, con los que Planck contaba desde que se planteó el problema del cuerpo negro y con los cuales se le había otorgado validez a los trabajo de Kirchhoff, Stefan y Wien. Puede considerarse que con esta condición Planck mantiene la validez de los principios de la termodinámica y la validez que tiene la experiencia. Será una hipótesis que se pruebe *a posteriori* revisando las consecuencias de su aplicación.

Es importante ver cómo es posible partir de los elementos que dan las teorías ya establecidas, y el papel que comienza a tener la hipótesis en el trabajo de Planck. Dynnik (1963:448) afirma que “Planck comprendía de manera dialéctica la correlación entre lo abstracto y lo concreto”; precisamente por su interés de contar con la imagen objetiva del mundo físico, reflejo de la unidad real de la naturaleza misma, buscaba quitar el carácter antropomórfico de la física que se basaba en los registros de la información captada por los sentidos, por lo que es necesario acudir al pensamiento abstracto que se concreta en las leyes de la naturaleza. Así el proceso del planteamiento de la hipótesis, como abstracto, y su confirmación *a posteriori*, con los datos experimentales concretos, conforma la realidad del *comportamiento* de la radiación; de modo tal que la ley de emisión y absorción de radiación quede expresada en “ecuaciones de la mecánica o de la electrodinámica [que no] conduzcan a un resultado inequívoco de acuerdo con la experiencia”.

Para este momento, Planck conocía muy bien el trabajo que Boltzmann había realizado frente a la definición de la entropía desde la mirada mecanicista de la termodinámica, para lo cual había formulado la hipótesis especial del *caos molecular*.⁴⁴ Esto implicaba que reconociendo la hipótesis atómica en los sistemas físicos, era necesario considerar *a priori* un número finito de configuraciones igualmente probables,⁴⁵ o complejiones, a través de las cuales un estado macroscópico considerado podía darse. Así el caos molecular aseguraba la mayor cantidad de complejiones, puesto que implica una mayor probabilidad del estado (Planck, 1915:44).

Concebir la hipótesis especial del caos molecular y la radiación natural,⁴⁶ más que admitir una hipótesis sobre la composición y estructura de la materia, da cabida a una forma de proceder frente a la determinación de una magnitud. La paradoja de tener un único valor macroscópico, del estado de un sistema, dado por cualquiera de las infinitas configuraciones microscópicas de los estados mecánicos de las partículas del sistema, queda resuelta al admitir el caos molecular como la configuración más probable, de manera que no es necesario conocer el estado mecánico de cada elemento o molécula porque cada estado tiene la misma probabilidad de existir. Así se cambia la manera de concebir la medida de una magnitud, ya no como el valor

⁴⁴ En una cita a pie de página Planck (1914:117) hace referencia al trabajo de Boltzmann, titulado *Vorlesungen über Gastheorie de 1896*, en el que señala que para hablar de calor en términos mecánicos es necesario considerar el “caos molecular”. Además de esto Kuhn (1980:83) expone la discusión sostenida entre Planck y Boltzmann, en 1894, respecto a las consideraciones de la interacción entre moléculas y su efecto en la descripción del estado de los gases; lo que llevaría a que el *caos molecular* fuera la característica que eliminaría cualquier inconsistencia en la explicación probabilística de la entropía.

⁴⁵ Stumpf fundó la teoría subjetiva de la probabilidad que consiste: “Basa la estimación de casos igualmente probables (...) en el *principio de razón deficiente*; decimos que las seis caras de un dado son igualmente probables porque no tenemos ninguna razón para dar preferencia a ninguna cara” (Reichenbach, 1955:184). Reichenbach y otros, establecen una teoría objetiva de la probabilidad desde la cual “hay una razón muy positiva que lleva a la afirmación de igual probabilidad: la construcción homogénea del dado (...). Según principios completamente determinados, escogemos ciertos casos como igualmente probables y afirmamos que este supuesto se confirma con la experiencia” (Reichenbach, 1955:186). En el caso del caos molecular, no se considera el principio de razón deficiente como justificación en la explicación del comportamiento de los gases; puesto que con el trabajo de Boltzmann y con los resultados de Planck, obtenidos al aplicarlo en la explicación del cuerpo negro, las configuraciones igualmente probables se comprueban con los resultados experimentales.

⁴⁶ Hipótesis que Planck realiza al describir el comportamiento de los resonadores que componen la cavidad de radiación. La radiación natural sería la condición inicial de los resonadores que evitaría que el proceso fuera reversible.

promedio de cada uno de los elementos del sistema sino como la medida de la probabilidad.⁴⁷

Dentro del proceso de admisión de la probabilidad como una manera de definir las leyes naturales es posible reconocer tres aspectos, que son determinantes en la caracterización de la tensión y en los resultados que emergieron (como el cambio en la manera de ver el comportamiento de la naturaleza que se discute en el siguiente capítulo). El primero de estos aspectos es la existencia de un elemento común que permite la consideración de un vínculo entre la entropía y la probabilidad: *la validez universal*, Planck lo expone de la siguiente manera:

Ahora bien, como el concepto de entropía, así como el segundo principio de la termodinámica, tiene aplicación universal, y como por otra parte las leyes de la probabilidad tienen no menos validez universal, es de esperar que la conexión entre la entropía y la probabilidad deba ser muy cercana. (Planck, 1914:118)

La introducción de la hipótesis especial, con una validez *a posteriori*, fue admitida en tanto que la entropía, considerada en términos de probabilidad, hizo posible que los datos que arrojaba la teoría sobre el cuerpo negro coincidieran con los datos experimentales; de esta manera la *ley del aumento de entropía*, quedaba comprobada tanto para fenómenos mecánicos, térmicos y electromagnéticos. Es decir, la segunda ley de la termodinámica tiene un carácter universal y absoluto.

Por su parte, las *leyes de la probabilidad* responden a exigencias lógicas, al igual que la geometría, de modo que “su concepto de verdad es el de la lógica rigurosa y no el concepto de probabilidad” (Reichenbach, 1955:183).

La relación entre la entropía y la probabilidad es el segundo elemento de análisis. Nuevamente se acude al caos molecular, pues al ser admitida la entropía, que macroscópicamente da cuenta de la manera como avanzan los procesos en la

⁴⁷ En este sentido, la hipótesis planteada por Boltzmann del caos molecular debe ser considerada, en tanto que define la manera de medir la entropía y con esta se da cuenta de la segunda ley termodinámica en el fenómeno de radiación. Es así como Planck da cabida a la probabilidad en la determinación de una magnitud física, desde el punto de vista microscópico la entropía se liga al estado más probable que puede tener un sistema al que no puede hacerse un seguimiento por las condiciones que lo definen. Planck (1914:117) lo ilustra de la siguiente manera: la tendencia a neutralizar cualquier diferencia de temperaturas está conectado con un aumento de entropía, desde la termodinámica; esto no tiene significado para un observador mecanicista, para él el equilibrio térmico está conectado con la distribución de los elementos que es más probable en el estado caótico: una distribución uniforme.

naturaleza, se vincula a las configuraciones más probables en el estado mecánico de las partículas de un sistema. Es decir, los estados se definen en términos de la tendencia a que existan, como puede ser entendida la probabilidad matemática. De tal manera que Planck (1914:18) propone la siguiente conexión: “La entropía de un sistema físico en un estado definido depende únicamente de la probabilidad de este estado”.

Y por último, *la búsqueda del sentido físico* es el tercer aspecto que define la tensión. La probabilidad que da cuenta del estado de un sistema, debe ser una probabilidad termodinámica y debe coincidir con la entropía definida desde la mirada macroscópica, dado que para Planck desde esta mirada se encuentra el vínculo con la realidad. “Siempre y cuando la probabilidad de un estado no esté numéricamente definida, la exactitud de la [relación entre la entropía y la probabilidad de los estados] no puede ser cuantitativamente probada”, pero como la determinación numérica de la probabilidad trae consigo dificultades, Planck añade, “puede ser demostrado mediante una simple deducción que es posible (...) determinar de manera general la forma en que la entropía depende de la probabilidad, sin mayor discusión sobre la probabilidad de un estado” (Planck, 1914:18).

Frente a este último aspecto, Reichenbach (1955:183) comenta que la probabilidad dentro del campo de la matemática no ofrece ningún problema de tipo gnosológico, sin embargo cuando se piensa su aplicación en la física aparecen cuestionamientos como: ¿son aplicables los axiomas del cálculo de probabilidades a la realidad? El trabajo realizado por Boltzmann y la tensión en Planck, muestran una respuesta afirmativa a la pregunta; ¿qué es lo que se afirma con el cálculo de probabilidades sobre la realidad? por lo que sugiere Reichenbach: “la física tendrá que acoger, naturalmente, todo el edificio lógico del cálculo de probabilidades” y, se tendría que añadir el trabajo de, encontrar un sentido físico a la probabilidad.

Si bien en estos tres aspectos se pone en evidencia que Planck deja de lado su posición frente a las hipótesis especiales, no entra en negociación el carácter absoluto de la entropía; el aumento de entropía como ley universal no se cuestiona. Los absolutos siguen guardando importancia dentro de la explicación, de modo que la probabilidad debe ser entendida de manera que no entre en contradicción con estos. Al

expresar que “la entropía de un sistema físico en un estado definido depende únicamente de la probabilidad del este estado”, se está indicando una relación adicional que da sentido al vínculo entre entropía y probabilidad. Ésta es, así como desde una mirada macroscópica, el estado al que tienden de manera natural los sistemas, a través de un proceso irreversible, es el equilibrio; éste queda representado desde una mirada microscópica por la tendencia hacia el *caos molecular* que es la distribución de estado más probable de las partes del sistema.

Desde el examen probabilístico, la definición de los estados de un sistema depende de las leyes de la probabilidad:

A través de esta concepción de la segunda ley de la termodinámica se elimina de un solo golpe su aislamiento, el misterio sobre la preferencia de la naturaleza [por la realización de ciertos procesos sobre otros] desaparece, y el principio de entropía se reduce a una ley bien entendida del cálculo de probabilidades. (Planck, 1915:44)

Sin embargo el cálculo de probabilidades debe tener un sentido como medida de un sistema físico. Por esto es que nuevamente se vuelve sobre la tensión; es necesario definir la probabilidad termodinámica de manera que dé cuenta del estado mecánico microscópico de un sistema y se vincule al estado macroscópico registrado.

Entonces ¿cómo se entiende la probabilidad termodinámica de un estado? Los estados pueden ser microscópicos o macroscópicos de acuerdo al tipo de observación y tratamiento que se realice, así si los observadores efectúan un abordaje mecánico o electrodinámico se consideran estados microscópicos, pero si el abordaje es desde la termodinámica; el estado es considerado como conformado por un gran número de estados microscópicos cuyos valores medios constituyen las cantidades macroscópicas del estado. Aunque el tipo de observación define la clase de estado, Planck vincula la definición y el cumplimiento de la segunda ley como determinante de la caracterización de las clases, afirmando que si no es posible que en los procesos definidos se cumpla la segunda ley, se está definiendo un estado microscópico, pero si se cumple el estado es macroscópico. Claro, como en el estado macroscópico se conciben los valores medios de los estados microscópicos que los componen es necesario considerar la hipótesis especial del *caos molecular*, así la entropía que es definida por Planck como una función de la probabilidad del estado, está vinculada con

la definición de estados macroscópicos: “los procesos macroscópicos toman lugar en un camino, para nada ambiguo, en el sentido de la segunda ley, cuando, y sólo cuando, la hipótesis del caos molecular es satisfecha” (Planck, 1914:121).

El *caos molecular* garantiza que los estados microscópicos no dependan del conocimiento del estado mecánico específico de cada molécula que compone un gas, sino que da cuenta de distribuciones probables dentro del sistema. Así al ser considerado un estado macroscópico como dependiente de los microestados, no se corre el riesgo de subjetividades a la hora de hacer la medición, por ejemplo de la entropía.

Brevemente, la probabilidad termodinámica implica que “el número de microestados correspondientes al macroestado dado se encuentre haciendo un conteo que involucra distribuir P objetos indistinguibles en N cajas” (Del Río, 2001:108). En términos del macroestado de un gas implicaría hacer la distribución de P moléculas en N celdas de velocidad. Es desde este análisis que Planck define la constante universal, llamada constante de Boltzmann, que corresponde a la constante absoluta de los gases y se refiere a las moléculas reales que lo componen (Planck, 1958:243). Así la entropía queda definida desde dos absolutos, la constante de los gases y la probabilidad termodinámica.

Entonces, Planck encuentra en el vínculo de la mirada macroscópica y microscópica de la naturaleza la manera de definir la entropía de los sistemas, ya no como se hacía desde la definición de Clausius considerando pequeños procesos reversibles en los cuales la entropía era constante para luego comparar sus valores entre los estados inicial y final de un proceso, sino como una cualidad inherente al estado de un sistema (Planck, 1961:193), cuya magnitud existe independientemente de los procesos que realice o de la manera como se interprete la distribución de las partículas del sistema. Encontrar la entropía de un sistema de N partículas en un estado termodinámico es, encontrar una magnitud cuya cantidad finita realmente existe, esta es una consecuencia inmediata de la proposición que la entropía tiene un valor absoluto y de la exigencia de un valor absoluto para la magnitud de la probabilidad termodinámica (Planck, 1914:125).

De esta manera frente a la pregunta que se reseñó en el primer capítulo, con Kuhn (1980:47), sobre cómo puede ser entendido que la entropía, la magnitud de la dirección de los procesos, tenga en todas las condiciones un valor enteramente determinado, si las consideraciones probabilísticas indicarían tanto estados improbables como estados probables, careciendo de sentido que el cambio en la naturaleza siempre proceda de estados de probabilidad baja a estados de probabilidad alta. El sentido se adquiere cuando la entropía es considerada, no sólo como la medida de comparación entre dos momentos de un proceso sino, como una cualidad de los sistemas y cuya información indica el estado en el que se encuentra el sistema y las posibilidades de cambio que pueden seguir. Así con la admisión del *caos molecular* la probabilidad se liga fácilmente con la idea de la tendencia al equilibrio; de modo que el estado más probable macroscópicamente es el equilibrio, estado que, desde una mirada microscópica, indica una distribución de estados igualmente probables.

Estas consideraciones sobre la tensión entre absoluto y probabilidad traen consecuencias en la explicación sobre la radiación de calor. Aunque no es motivo de análisis dentro de la tensión se configura en tema importante. Porque con la admisión de la probabilidad como medida de una magnitud física y con la admisión del *caos molecular* y de la *radiación natural* como hipótesis especiales que dan sentido físico a las expresiones matemáticas de la entropía y de la relación entre radiación y materia (cuerpo negro) respectivamente, se da cabida a otra hipótesis: la radiación de energía debe ser estudiada, al igual que la materia, desde una concepción atómica.⁴⁸ Y los resultados encontrados por Planck exigen que se considere como hipótesis el *cuanto de acción*.

Heilbron (1986:20) lo sintetiza en dos suposiciones que fueron revolucionarias en la física y que para Planck, como se ha dicho, causaron un cambio en la forma de entender el comportamiento de la naturaleza. Una fue el cálculo de probabilidades para varias distribuciones de energía de los resonadores del cuerpo negro, de manera

⁴⁸ Esto se puede sustentar en la siguiente cita de Planck (1915:46): "Si la entropía de la radiación de calor es referida a la noción de probabilidad, estamos forzados, de manera similar que el anterior, a concluir que para la radiación de calor la concepción atómica posee un significado definitivo. Pero, ya que el calor radiado no está directamente conectado con la materia, entonces esta concepción atomista se refiere, no a la materia, sino a la energía, y por lo tanto, que en la radiación de calor ciertos elementos de energía juegan un papel esencial".

paralela al cálculo de Boltzmann. La segunda suposición fue la división de la energía total radiada entre los resonadores de una frecuencia dada (ν) encontrando unidades de energía (ϵ_ν) que cumplieran con la relación $\epsilon_\nu = h\nu$, donde h es la conocida constante de Planck, lo que indica que la energía actúa por paquetes cuyo valor es múltiplo entero de h .⁴⁹

Tanto la introducción probabilística en la explicación del cuerpo negro y en la definición de la entropía, como su implicación en el comportamiento de la energía al interactuar con la materia, deben ser estudiadas y valoradas dentro de los límites explicativos que la tradición científica tenía a finales del siglo XIX, debido a que fue desde ésta que se abrió la puerta a una nueva consideración sobre el comportamiento de la naturaleza.

2.2 La tradición científica en la tensión entre principios racionales

El trabajo que realizó Planck para definir la entropía, como una magnitud que precisa el estado y el proceso de cualquier sistema en la naturaleza, fue la emergencia de la tensión a la que se vieron sometidos los principios racionales que guiaban su investigación científica. Y es desde el resultado de ese esfuerzo racional que se consideraron pertinentes tres aspectos para caracterizar la tensión: la *validez universal* como elemento común entre la entropía y la probabilidad, en otras palabras, entre lo absoluto y la probabilidad; la *relación entre la entropía y la probabilidad*, en tanto que, como una expresión algorítmica, la entropía, desde una mirada macroscópica o desde una mirada microscópica, puede dar cuenta del estado de equilibrio de un sistema; y, la *búsqueda del sentido físico* a la expresión algorítmica que vincula tanto el tratamiento teórico en el que se considera la hipótesis especial del *caos molecular* como los datos que se tienen en el laboratorio.

⁴⁹ Al vincularse la entropía, definida desde la probabilidad termodinámica, en la descripción del problema del cuerpo negro se tiene: "el macroestado del sistema [caracterizado] por la energía E_ν , supone que la energía está granulada en quanta de magnitud $h\nu$, entonces P_ν es el número de quanta que conforman el macroestado, los cuales distribuye en N_ν , osciladores distinguibles" (Del Río, 2001:108).

Estos aspectos pueden ser enmarcados en lo que Holton (1985:7) denomina como el plano contingente del trabajo científico, que se caracteriza por la aplicación empírica y analítica que tiene cualquier proposición científica. Lo que significa que el trabajo científico se ubica dentro de un campo teórico bien definido. Así que es en el terreno de la física donde la tensión adquiere sentido, especialmente por el centro de la tensión: la entropía; desde la física hay una serie de experiencias, bien sea obtenidas en el laboratorio o de experimentos mentales, que dan sentido a la existencia de esta magnitud, así como una fundamentación teórica que permite que se vincule la entropía en la definición de una ley universal, la ley del aumento de entropía.

De la misma manera, es posible reconocer en esta tensión un compromiso *a priori* de Planck frente a la tarea de definir el aumento de entropía como un principio absoluto. En el momento que Planck realiza el trabajo sobre el cuerpo negro, algunos científicos estaban en la tarea de encontrar la relación entre la energía radiada y la temperatura, únicamente Planck estaba realmente interesado en demostrar que la segunda ley de la termodinámica no sólo se cumplía en el terreno de los fenómenos térmicos sino que, al igual que la primera ley termodinámica, era un principio que se encontraba en cualquier proceso natural, por esto su preocupación se centró en encontrar la relación de la entropía en el fenómeno de emisión y radiación. A esta dimensión del trabajo científico Holton la denomina como *dimensión temática*.⁵⁰

Cuando Planck (1961:90) afirma que la principal cualidad que debe tener la imagen del mundo, obtenida por el físico, es que exista el acuerdo más perfecto posible entre el mundo real y el mundo de la experiencia sensorial, se reconoce la necesidad de describir la naturaleza de la manera más sencilla posible, sin acudir a hipótesis especiales, así como de buscar la unidad de la naturaleza (o, según los principios de Newton, la uniformidad de la naturaleza), y utilizar los absolutos en la explicación física.⁵¹ Entonces en la dimensión empírica, así como en la analítica y en la

⁵⁰ En la dimensión de los temas se involucran aquellos prejuicios fundamentales y estables que responden a menudo a una motivación inicial del científico o a la labor continuadora dentro de una comunidad científica (Holton, 1985:8).

⁵¹ Kuhn (1980:51) afirma que Planck para finales del siglo XIX estaba vinculado a esta tradición, de tal manera que al publicar los artículos de 1900, sobre la radiación de cuerpo negro, se sugería una transición de las ecuaciones newtonianas a las de la electrodinámica de Maxwell, que obligaban a un cambio en los fundamentos del trabajo científico realizado.

temática, se ubica la tradición científica. Por lo que, la tensión entre absoluto y probabilidad se da en tanto hay una carga teórico-empírica que guía el trabajo de Planck; como se reseñó en páginas anteriores, ésta corresponde al mecanicismo y a los principios de la física newtoniana.⁵²

Así cuando Planck acudió a la *validez universal*, estaba asistiendo a lo que Kuhn llama la investigación normal, es decir acude a los elementos característicos de la teoría en la que fundamenta sus búsquedas y procede de acuerdo a los compromisos que la tradición científica le exige: la búsqueda de la unidad en la naturaleza y la definición de absolutos. Sin embargo, otorgando el criterio de *validez*, tanto a la entropía como al cálculo probabilístico, es donde se encuentra la tensión; ya que la probabilidad matemática se aparta de la idea que se tiene, desde el mecanicismo, de las magnitudes físicas como cantidades objetivas que determinan las características únicas de un sistema en un momento y lugar determinado. Así cuando se dice que la velocidad de una partícula en el primer segundo de caída (caída libre) es 9.8m/s, se indica que ese era el estado de movimiento que caracterizaba a la partícula y no otro; pero si se utilizara la probabilidad, en este caso, se diría que la partícula tiene una alta probabilidad de estar moviéndose a una velocidad de 9.8m/s, lo que significa que cabe la posibilidad que no sea (o que sea) propiamente ese el estado de movimiento de la partícula.⁵³

⁵² En el tercer libro de los *Principia de Newton* se encuentran las cuatro reglas del razonamiento en filosofía, entendiendo que habla de la filosofía natural: 1) No se deben introducir más hipótesis de las que sean suficientes y necesarias para la explicación de los hechos observados. 2) Asignarse a efectos similares la misma causa; principio de uniformidad de la naturaleza. 3) Las propiedades comunes a todos los cuerpos que se encuentran al alcance de experimento deben suponerse pertenecientes a todos los cuerpos en general, consideración necesaria para formar universales. 4) Las proposiciones obtenidas por inducción general deben considerarse como aproximadamente ciertas hasta que los fenómenos o experimentos muestren que se les puede corregir, o den cabida a excepciones. (Holton, 1985:16)

⁵³ En una nota al pie anterior se comentó una posición frente al cálculo de probabilidades que considera que su uso para la descripción de la realidad se debe a cierto grado de ignorancia, ésta es *la teoría subjetiva de la probabilidad*. Desde esta posición se plantea la imposibilidad de encontrar una explicación que satisfaga a una física ideal, puesto que se basa en el *principio de razón deficiente*. Por ejemplo la imposibilidad de conocer el movimiento de cada partícula que compone un gas ideal hace que se acuda a la probabilidad y que el principio de Boltzmann sea un principio auxiliar (Reichenbach, 1955:184). Esta posición no se considera dentro del análisis de la tensión en el trabajo de Planck, pues invalida la posibilidad que la probabilidad sea un recurso explicativo en la física. En su lugar se reconoce la propuesta de Reichenbach y otros, quienes establecen una *teoría objetiva de la probabilidad* desde la cual es posible confirmar el cálculo de probabilidades en la realidad: “el hecho de que con las leyes de probabilidad llegamos a proposiciones certeras sobre la naturaleza [como en el caso de la radiación de cuerpo negro] demuestra que hay aquí algo más que una ignorancia, y que con el concepto de probabilidad poseemos un saber muy positivo” (Reichenbach, 1955:186).

En el caso del cuerpo negro, Planck centra su interés en demostrar que el comportamiento de absorción y emisión de radiación es un proceso irreversible, por lo que acude a los elementos teóricos con los que contaba, la definición de entropía realizada por su maestro Clausius y las leyes electromagnéticas de Maxwell. A pesar de que estos cuentan con la precisión, coherencia y amplitud,⁵⁴ por los que son considerados como elementos dentro de un campo teórico, en el caso de la descripción del cuerpo negro no respondían con los intereses de la búsqueda y entra en una tensión.

Kuhn define que la tensión en la investigación científica se da cuando entran en conflicto dos modos de pensar contrapuestos: el pensamiento convergente y el pensamiento divergente. El primero caracteriza a la investigación normal, es decir, es el pensamiento que dentro del consenso establecido, dentro de una tradición científica, busca que la teoría y las observaciones se ajusten; o extender la teoría a campos que, se espera, pueden ser abarcados; o bien recoger datos que hacen falta para aplicar o extender la teoría (Kuhn, 1982:256). Mientras que el pensamiento divergente se caracteriza por ser flexible e imparcial, hace posible revalorar y renovar los elementos de teorías anteriores hasta encontrar nuevos significados y nuevas relaciones (Kuhn, 1982:249).

Es necesario aclarar que esta propuesta de Kuhn se centra en la consideración del científico como comunidad científica, como el equipo intelectual e instrumental que se ubica dentro de una tradición científica específica. Pero como hasta el momento se ha hecho notar, en este trabajo se identifica la tensión en un científico particular, no por ello aislado de la comunidad científica, pero si con intereses propios que lo llevan a abordar el problema del cuerpo negro como no se había hecho antes. Sin embargo, la definición de tensión en la investigación científica, dada por Kuhn, brinda un elemento de análisis importante: la tradición científica en la que se enmarca el trabajo de Planck es determinante en la tensión resultante.

Continuando con el análisis, Planck comprometido con una tradición científica y con unos intereses en la investigación, reconoce y emplea unas formas de proceder

⁵⁴ Kuhn (1982:349) identifica como criterios estándar para evaluar una teoría: la precisión, la coherencia, la amplitud y la simplicidad.

frente al objeto de estudio buscando que converjan en el sistema teórico desde el que se realiza la investigación. Pero los encuentra insuficientes, con ellos no logra la explicación esperada y se ve en la necesidad de abandonar sus compromisos teóricos, de cuestionar los principios racionales que orientaban su investigación y abordar el problema desde otra perspectiva. Es así como se encuentra en uno de sus escritos de 1909, una de las deficiencias del sistema teórico en el que se desenvolvía:

Ya me he referido al cierre de la primera conferencia sobre el hecho de que en la termodinámica pura, que no sabe nada de una estructura atómica y que se refiere a todas las sustancias como absolutamente continuas, la diferencia entre procesos reversibles e irreversibles sólo se puede definir de una manera, que *a priori* lleva un carácter provisional y no resistente a la penetración de análisis. Esto parece evidente de inmediato cuando se refleja que la definición puramente termodinámica de irreversibilidad que procede de la imposibilidad de la realización de ciertos cambios en la naturaleza. (Planck, 1915:41)

Esto indica que Planck reconoce que la termodinámica no le brinda los elementos suficientes que le exige la explicación de la absorción y emisión de radiación, entre otras cosas, porque la segunda ley de la termodinámica, que debe ser verificada en cualquier fenómeno natural, no está bien definida. Puesto que en la descripción de los procesos termodinámicos, tanto en los trabajos de Clausius como en los de Carnot, se utilizan modelos o experimentos mentales que idealizan cualquier acción que se pueda realizar en el laboratorio. Esto es lo que muestra “el carácter provisional y no resistente a la penetración de análisis” que señala Planck.

También se encuentra en una carta que Planck le escribe al físico estadounidense Robert Williams Wood en 1931, donde le expone su estudio del cuerpo negro, las deficiencias que encuentra en las teorías, al no explicar el equilibrio entre la radiación y la materia. De modo que se ve obligado a reconocer otras formas de abordar el problema:

Lo que hice como un acto de desesperación (...) había estado luchando sin éxito durante seis años [1894-1900] con el problema del equilibrio entre radiación y materia (...) había que encontrar costase lo que costase, una interpretación teórica. Tenía claro que la física clásica no podía ofrecer una solución a este problema, puesto que con ella se llega a que a partir de un cierto momento toda la energía será transferida de la materia a la radiación (...). El punto de partida fue mantener las leyes de la termodinámica (...) por lo demás estaba dispuesto a sacrificar cualquiera de mis convicciones anteriores sobre las leyes físicas. Boltzmann había explicado cómo se establece el equilibrio termodinámico mediante el equilibrio estadístico, y si se aplica semejante método al equilibrio en la materia y la

radiación, se encuentra que se puede evitar la continua transformación de energía en radiación suponiendo que la energía está obligada, desde el comienzo, a permanecer agrupada en ciertos cuantos. Ésta fue una suposición puramente formal y en realidad no pensé mucho en ella. (Planck en: Sánchez, 2007:347)

De manera que al poner en juego la tradición teórica, se encuentra Planck en la obligación de reconocer las ventajas que traía la aplicación de la entropía definida por Boltzmann desde el cálculo de probabilidades. Esto que Planck nombra como “acto de desesperación”, que lo llevó a sacrificar la posición que tenía sobre las hipótesis especiales, es lo que caracteriza Kuhn como pensamiento divergente; y es lo que puso en tensión la definición de la entropía como un absoluto y con ello la mirada sobre la constitución de las sustancias y el comportamiento de la radiación de energía.

¿Por qué Planck pone en consideración el trabajo realizado por Boltzmann dentro de la explicación física? ¿Por qué elige una mirada sobre la naturaleza que no coincide con la que guía su investigación? Para dar respuesta a estas preguntas se tendrán en cuenta otras que Kuhn (1982: 349) plantea “¿en qué parte del campo [científico] se halla trabajando [Planck] al enfrentarse a la necesidad de elegir? ¿Cuánto había trabajado allí; qué tanto éxito había tenido, y qué cantidad de su trabajo depende de los conceptos y las técnicas impugnadas por la nueva teoría?”

El trabajo de Boltzmann sobre la teoría cinética de los gases, al igual que la termodinámica, contaba con el carácter de objetividad, precisión y coherencia que se exige a cualquier teoría; de manera que había sido tema de estudio y discusión en la comunidad científica. Planck en su primer artículo sobre los procesos de radiación irreversible, entregado a la Academia Prusiana en 1897, expone su desacuerdo con Boltzmann, dejando ver su conocimiento en profundidad de este trabajo:

Indudablemente, la teoría cinética tiene la tarea de explicar la tendencia al equilibrio térmico (...) como un resultado final de todas las colisiones entre las incontables moléculas, las cuales concebidas como puntos, interactúan a través de fuerzas conservativas. Sin embargo un estudio más detallado muestra que los movimientos moleculares asumidos por la teoría cinética de gases no poseen una dirección en el tiempo. (Planck en: Del Rio, 2010:116)

En el último artículo de la serie publicado en 1899, señala que el cálculo de probabilidades:

(...) ha provocado objeciones a la teoría de los gases, por un lado, y dudas sobre la validez del segundo principio, por otro. Pero en realidad no cabe ni dudar de alternativas como estas (...) Nada se opone al desarrollo general de la hipótesis del desorden molecular. La posibilidad de elaborar en todas direcciones el segundo principio sobre la base de la teoría cinética de los gases queda así asegurada. (Planck en: Del Rio, 2010:140)

De modo que Planck acude al trabajo de Boltzmann porque conoce los alcances que tiene en la explicación de algunos fenómenos. A pesar de no estar ubicado dentro de los principios racionales que guían su investigación, corresponde a lo que Planck considera pertinente dentro de la explicación y a lo que puede legitimar dentro de su discurso: “para que un principio sea reconocido depende de que no entre en contradicción con la imagen del mundo físico” (Planck, 1960:22); este, según Kuhn, es un criterio de elección entre teorías.⁵⁵ Es decir, cuando Planck le impone la condición a la hipótesis del caos molecular de corresponderse *a posteriori* con los datos experimentales considerados como válidos, está considerando la existencia de otros elementos en la explicación física, las hipótesis especiales, y al encontrar tal correspondencia las legitima dentro de las explicaciones.

Planck en 1932, haciendo una reflexión sobre los resultados de su trabajo como científico, agrega a este punto: las modificaciones en la síntesis teórica se dan en tanto hay una presión desde un cuerpo teórico, consolidado gracias a los estudios experimentales, que genera la revisión de los “dogmas teóricos”. Esto trae problemas que la investigación experimental resuelve y así mismo nuevas ideas que conducen al planteamiento de otras teorías o hipótesis (Planck, 1961:45).

La tradición científica entonces no sólo se ve reflejada en los compromisos teóricos en la investigación; sino también, en los criterios de selección a la hora de tomar opciones de unas teorías sobre otras. Esto muestra que la tensión existe en tanto hay un campo de acción definido por dichos compromisos y criterios, de lo contrario Planck no hubiera encontrado en: la *validez universal*; la *relación entre entropía y probabilidad*; y en la *búsqueda del sentido físico*, la gestación de una nueva forma de entender el comportamiento de la naturaleza. A la vez la tensión debe ser

⁵⁵ Según Kuhn (1982:355), los criterios que influyen en las elecciones entre dos teorías son las máximas, normas o valores. Los valores especifican lo que el científico toma en cuenta, lo que considera o no pertinente para tomar una decisión, así como “lo que puede pedírsele legítimamente que comunique como base de la elección tomada”.

considerada como actividad propia del investigador en su interés por describir y explicar los fenómenos que observa, así la tensión es una actividad racional.

2.3 La tensión como actividad racional

La imagen de la tensión entre los principios racionales que guían la investigación de Planck, que hasta el momento se ha expuesto, es análoga a la imagen que desde la teoría de campo explica los fenómenos electromagnéticos. La tensión, que se presenta en un campo de acción producido por los compromisos del investigador dentro de una tradición científica, es generada al ser perturbado el campo por presiones ejercidas por síntesis teóricas desde las cuales se puede abordar el problema de investigación, en el caso de Planck: la definición de la entropía. Este estado de perturbación del campo se encuentra caracterizado por líneas de fuerza, las descripciones macroscópica y microscópica de los fenómenos físicos, que punto a punto definen el estado del campo de acuerdo a los criterios que dan sentido al vínculo entre entropía y probabilidad. De este modo el campo de acción del investigador llega a un estado de equilibrio dinámico, que le permite involucrar dicho vínculo en la explicación del fenómeno de absorción y emisión de radiación.

El trabajo realizado por Planck es un esfuerzo por comprender y analizar la realidad física de la naturaleza, cuyo resultado fue un nuevo esquema teórico, posterior al descubrimiento del espectro de radiación de cuerpo negro, que generó una de las crisis de la física.⁵⁶ Aunque podría hacerse una discusión al respecto no se hará en estas páginas, en su lugar se centra la atención en la actividad intelectual que Planck realizó y que resulta ser otra de las características de lo que hasta el momento se ha denominado como tensión.

⁵⁶ Nicol (1965:13) considera que dentro de la física la gestación de la física cuántica y la relatividad generó una crisis dentro de los principios que orientaban al físico. Otros investigadores del nacimiento de la física cuántica y del papel de Planck en esta causa, como Lozano (2001:99), muestran a Planck como uno de los mayores revolucionarios de la historia y por tanto no hablan de crisis en la física, sino de revoluciones; y la que dio inicio Planck, la revolución cuántica llevó a cambiar la visión sobre el universo.

Holton (1985:9) sostiene que invariablemente para cada teoría se encuentra una que se vale de un tema⁵⁷ opuesto, o antitema, que frente a un objeto de estudio común, una meta común, como la definición de la entropía, se da un proceso dialéctico –proceso que se ha caracterizado como tensión en los principios racionales que guían la investigación de Planck– y “quizá se halle entre los más poderosos reconstituyentes de la investigación”. Valor que adquiere la tensión que se ha definido y que obliga a considerarla dentro del proceso de conocimiento del científico.

Como se ha recalcado en varios párrafos de este capítulo, la hipótesis del *caos molecular* es necesaria para dar sentido físico a la entropía definida desde la probabilidad termodinámica. Y justamente tiene un valor importante en cuanto al acto de conocimiento que realiza Planck para explicar uno de los fenómenos que se escapaba a la física, la radiación de cuerpo negro, y, la más importante, definir la magnitud que permite dar cuenta de una ley absoluta –la entropía–, así como de dos constantes universales –la constante de Boltzmann y la constante de Planck–. ¿Cuál es el valor de la hipótesis en este proceso?

Planck realiza un análisis sobre la actividad del investigador, treinta años después de publicar su gran obra en 1900, y en la que se puede encontrar respuesta a la pregunta. En ésta afirma que la hipótesis puede ser considerada como un rayo de luz sobre el terreno oscuro donde la visión no puede ser sometida a un juicio lógico, por lo que la hipótesis puede dar a luz una nueva teoría. La aplicación de la hipótesis se realiza entonces en periodos de la investigación que suscitan cambios, periodos de difícil gestación de las explicaciones, como en el que Planck fue protagonista, y en el que la física “marcha unas veces con pasos temblorosos y otros de manera firme hacia el descubrimiento del universo real externo” (Planck, 1961:96).

Los principios racionales que guían el trabajo de Planck son principios de experiencia y, dada su definición en el primer capítulo, se conjugan con el pensamiento divergente del científico. En tanto principios que guían la acción de acuerdo a una

⁵⁷ La palabra tema (o *themata*) en el trabajo de Holton, puede tener tres usos diferentes: el concepto temático, el tema metodológico y la hipótesis temática (Holton, 1982:26). Es lo que define el campo de acción de lo que se ha denominado como cuerpo teórico, parafraseando a Planck, o como esquema teórico, según Nicol; así como la manera de proceder del científico de acuerdo a sus compromisos teóricos.

lógica, la lógica del mecanicismo en este caso, no están fuera de la experiencia del ámbito de la física. Estos principios llevan a caminar con paso firme sobre los terrenos en los que las acciones del científico generan efectos que pueden ser leídos dentro del mismo terreno. Sin embargo, los pasos temblorosos a los que alude Planck, son las acciones del científico guiados por principios racionales en terrenos en los que la lógica no responde. Un ejemplo de este terreno es el problema de radiación de cuerpo negro.

Heilbron resume en unas cuantas líneas, la confianza que tuvo Planck en la explicación que se podía realizar de cualquier fenómeno de la naturaleza considerando su comportamiento continuo. Así realizó algunos trabajos en química, paralelamente a la investigación del cuerpo negro, pero los resultados lo llevaron a considerar otra visión:

Aunque Planck mantuvo por casi veinte años la confianza en que la mecánica del continuo podría ser compatible con el principio de entropía, él pronto encontró que no podía estar en el primer plano de la termoquímica sin recurrir a la visión molecular de la materia. (Heilbron, 1986:14)

En el momento que Planck acepta, bajo la condición de prueba experimental, la hipótesis del caos molecular, acepta otra lógica, la lógica de la probabilidad. Se configuran entonces los pares tema-antitema: absoluto-probabilidad y continuidad-discontinuidad, que son parte importante de la tensión en tanto proceso de elaboración de conocimiento. La hipótesis, que toma Planck de la teoría de Boltzmann, da la posibilidad de pensar de otra manera el comportamiento de la naturaleza, sin dejar de tener valor explicativo los absolutos y la imagen continua de la materia y la radiación. Por lo que la diada macro-micro (visión macroscópica-microscópica, macroestado-microestado), es necesariamente cuestionada.

El carácter disyunto de estas diadas se pierde en el momento que la hipótesis del caos *molecular* permite, por un lado, establecer la relación entre entropía y probabilidad y, por otro, al encontrar sentido físico a dicha relación. La afirmación de Planck (1914:121): “los procesos macroscópicos toman lugar en un camino, para nada ambiguo, en el sentido de la segunda ley, cuando, y sólo cuando, la hipótesis del caos molecular es satisfecha”, permite ver cómo las dos miradas, macroscópica y microscópica, hacen parte de una única lógica que las engloba, como lo propone Bachelard (2005:31). Al verificarse que la hipótesis lleva a resultados similares a los

obtenidos experimentalmente, cada una de las diadas será una característica del terreno donde se ubica el problema de estudio. Resultado de esto es que Planck defina la ecuación de la entropía y de la distribución de radiación de cuerpo negro desde la perspectiva probabilística sin que perdieran el carácter absoluto y sin que las leyes clásicas de la física perdieran su validez.

Al respecto se vincula una de las ideas, que según Kuhn, caracteriza la historia del desarrollo de las ciencias y da cuenta de cómo es necesario que el investigador tenga un pensamiento flexible (pensamiento divergente) que lo lleve a reconsiderar aspectos que guían su actividad y con ello dar significado a las nuevas relaciones que establece:

El científico debe reorganizar su equipo intelectual e instrumental en que ha venido confiando, y descartar algunos elementos de su credo y práctica anteriores hasta encontrar nuevos significados y nuevas relaciones entre muchos otros. Ya que, para asimilarlo a lo nuevo, lo antiguo debe ser revalorado y reordenado. (Kuhn, T. 1982:249)

Nuevamente, como en otros momentos del desarrollo del escrito, es necesario llamar la atención sobre la postura realista que tiene Planck frente al conocimiento de la naturaleza. Así, el científico puede inventar el mundo hipotético que desee, éste sólo tendrá valor cuando “el sistema teórico desde el que ha sido planteado (...) se corporiza con los resultados que se obtienen mediante mediciones experimentales” (Planck, 1961:98). Por lo que las hipótesis dentro de la actividad de conocimiento del investigador se pueden valorar con los hechos experimentales; no existe hipótesis sin dato experimental que sea considerada dentro de la tensión.⁵⁸

Retomando nuevamente el modo en que Planck comprobó la hipótesis del caos molecular, en la primera parte de este capítulo, se encuentra que los datos no apuntaban directamente a comprobar que la configuración más probable de las moléculas de un gas era el desorden, pues no se tenían datos de la distribución molecular de un gas; sino que comparó los resultados teóricos, de aplicar esta hipótesis a la definición de la entropía, con los datos que se tenían de la radiación de cuerpo negro. Entonces, los datos que se vinculan con la hipótesis planteada, como lo

⁵⁸ Como en otro momento se ha mencionado, Planck no concibe la posición positivista, por lo que la necesidad de datos experimentales, como prueba de la hipótesis, debe entenderse en el marco de la investigación que considera “los resultados de la medición como un intrincado complejo que registra las reacciones del mundo exterior, cuya exactitud depende solamente de los instrumentos de registro, sino también, y en gran medida, de la interpretación teórica del investigador” (Maksabedián, 1982:76).

afirma Maksabedián (1982:76), son los resultados que tienen un alcance práctico para resolver el problema.⁵⁹

Según Nicol (1965:13), en la física de finales del siglo XIX y principios del siglo XX, los descubrimientos se adelantaron a los esquemas teóricos desde los que pudiera fundamentarse su explicación. Entonces se contaba con un gran número de datos experimentales, que indicaban que el espectro de radiación de cuerpo negro podía ser expresado como una función acotada de la radiación y la temperatura. Es interesante cómo esta descripción realizada desde los resultados de los montajes experimentales elaborados en el PTR, a partir del desarrollo técnico más no desde la mirada teórica, permitieron dar validez a las propuestas que los físico teóricos realizaban sobre el fenómeno; especialmente posibilitaron que desde el trabajo de Planck se diera cabida a un nuevo esquema teórico, basado en la interacción discreta entre radiación y materia.

De acuerdo al seguimiento del trabajo de Planck, la hipótesis no surge como elemento primero del proceso de investigación. Inicialmente él contaba con datos experimentales, con los resultados de otros investigadores y con el conocimiento de un campo teórico, que le permitió plantear relaciones que describían parte del fenómeno; adicionalmente contaba con preocupaciones personales frente a la física que le condujeron a plantear preguntas que sus colegas no habían realizado. Es precisamente en este punto donde no encuentra suficientes los resultados de las otras investigaciones ni el sistema teórico desde el que trabajaba y es necesario acudir al planteamiento de nuevas relaciones, modelos, imágenes del comportamiento de la naturaleza. Entonces, la hipótesis es un enunciado que vincula la carga previa de la investigación con elementos teóricos antes no concebidos. Esta idea se robustece con las palabras de Planck:

Para formular [una hipótesis] el físico tiene que poseer dos características: un conocimiento práctico de todo el problema en que trabaja, así como una imaginación constructiva. Esto significa (...) que debe conocer los diversos tipos de

⁵⁹ Esta característica de la hipótesis se conjuga con la mirada que tenían algunos físicos contemporáneos a Planck frente al vínculo de las relaciones teóricas con los datos experimentales en la investigación en física. Por ejemplo, Einstein y Heisenberg quienes consideraban que aquellos conceptos que no tuvieran una correspondencia con la observación quedarían eliminados de la física. (Born, 1956:186)

mediciones (...) y poseer la habilidad de combinar en un solo punto de vista los resultados logrados con dos tipos diferentes. (Planck, 1961:93)

Adicionalmente a estas características se encuentra la propuesta de Bachelard (2005:39): el pensamiento del científico debe ser un "*pensamiento comprometido*" que "pone en juego su constitución misma"; puesto que el científico estando seguro de lo adquirido dentro de una tradición científica se arriesga a nuevas adquisiciones. Haciendo un vínculo con lo que plantea Planck, el riesgo significa que al combinar en una hipótesis los resultados de puntos de vista diferentes, y en ocasiones contrarios, se tenga que hacer una reestructuración en la manera como se entiende el comportamiento de la naturaleza.

Lo anterior es muy interesante; expone el elemento de subjetividad que tienen todas las ciencias, el investigador.⁶⁰ Si Planck no hubiese tenido la preocupación de encontrar en el fenómeno de absorción y emisión de radiación la segunda ley termodinámica, si no hubiese conocido los resultados de otros respecto al fenómeno, si no hubiese conocido el trabajo de Boltzmann respecto al comportamiento de los gases, es posible que el camino de su investigación hubiese sido diferente así como los resultados de su trabajo. Pero lo que se resalta es precisamente el ánimo de conjugar dos visiones diferentes frente al problema, es el carácter que tiene la imaginación constructiva, que plantea Planck, en la definición de la tensión entre los principios racionales que guían su trabajo investigativo.

Maksabedián (1982:74) considera que a diferencia del *rol* que cumple la imaginación en cualquier especulación o en las artes, en la investigación científica debe ser condicionada por las explicaciones plausibles dentro del proceso investigado y por la comprobación dentro de la práctica; "no se trata de ninguna manera de un vuelo por el reino de la fantasía".

Las hipótesis entonces responden a los intereses del investigador, a su imaginación que le permite conjugar elementos inicialmente desvinculados, esto implica que su planteamiento está limitado, restringido a los principios racionales que

⁶⁰ Holton (1985:3) citando a Einstein, quien insiste en la necesidad de ver la parte subjetiva de la fase naciente del trabajo científico, afirma que la ciencia como cuerpo de conocimientos puede ser concebida como objetiva e impersonal, pero "la ciencia [vista] como algo que está surgiendo, como meta, es tan subjetiva y tan psicológicamente condicionada como cualquier otro de los esfuerzos del hombre".

orientan el trabajo del investigador, “debe estar libre de todo aquello que constituya una incoherencia lógica”, debe responder a las mediciones realizadas en el laboratorio y con esto el investigador debe “organizar [los datos] bajo una ley” respondiendo al plan que guía su actividad (Planck, 1961:92). Son estas las razones por las que la hipótesis del caos molecular es admitida dentro de la explicación realizada por Planck, perdiendo el carácter de hipótesis y siendo la imagen del comportamiento de la naturaleza.

Por lo anterior la hipótesis en la investigación de Planck pone de manifiesto la necesidad de integrar dos aspectos dentro de la actividad racional del científico: el compromiso teórico y datos experimentales, por ser éstos los que dan cuenta de la realidad que se explica. El resultado de esta integración, particularmente en la física del siglo XX, ha permitido la constitución racional de experiencias que se expresan a partir de teoremas matemáticos (Bachelard, 2005:89). Ejemplo de esto es la solución que dio Planck al problema del cuerpo negro, que abrió la posibilidad de considerar el carácter probabilístico de los fenómenos de absorción y emisión de radiación, así como abrió el camino para considerar el carácter discontinuo de la energía.

Estos dos aspectos, que en la hipótesis del caos molecular, son los que permiten hacer vínculo de la mirada microscópica y macroscópica que Planck tenía de la naturaleza, son suficientes para dar razón de la relación entre la entropía y la probabilidad, en términos generales entre absoluto y probabilidad. Sin embargo no resultan suficientes para que Planck admita la naturaleza discreta de la radiación, de modo que el *cuanto de acción* en la obra de Planck nunca perdió su carácter de hipótesis. Así en la cuarta década del siglo XIX, a pesar del avanzado desarrollo que había tenido la física cuántica, Planck escribe en su “*Autobiografía científica*”:

Aunque el significado del cuanto de acción para la interrelación de la entropía y la probabilidad fue establecido en forma concluyente, no obstante, el papel desempeñado por esta nueva constante en el curso regular y uniforme de los procesos físicos, seguía siendo una incógnita. (Planck, 1958:243)

De acuerdo a lo que se ha planteado, la hipótesis se concibe dentro de un marco teórico y se formula desde el conocimiento de otro sistema teórico, este marco junto con datos dentro de la experiencia permiten hacer la valoración de la hipótesis. ¿Cumplía la hipótesis del *cuanto de acción* estos requisitos? No, el *cuanto* surge de la extrapolación de la hipótesis del caos molecular, propuesta en la descripción del

comportamiento de los gases, al comportamiento de la radiación, siendo necesario concebir el carácter “granular” de la energía. Para ese momento Planck estaba considerando dentro de su visión del mundo el carácter atómico de la materia, el cumplimiento de la hipótesis del caos molecular lo llevó a eso, por lo que no habían bases suficientes para plantear la hipótesis del *cuanto de acción*. Para ello sería necesario, según Planck (1914:IX), “un arduo trabajo teórico y experimental durante muchos años (...). Los frutos del trabajo pasado probablemente serán recogidos por la generación futura”.

Con esto se vuelve la mirada sobre el carácter histórico que al inicio del capítulo se mencionó. La formulación y la validación de las hipótesis dentro del trabajo del investigador, como un proceso racional, es un proceso histórico que integra elementos de perspectivas anteriores a las inquietudes presentes. No puede ser una acción instantánea porque como sentencia dentro de un cuerpo teórico debe tener, sino la fuerza demostrativa de la conclusión matemática, el poder de convicción de un hecho histórico (Heisenberg, 1979:134).

La tensión como una actividad racional, es una tensión entre principios racionales que guían la acción del investigador. En tanto se consideran principios de experiencia, ponen en relación los sistemas teóricos (imagen de la realidad), las hipótesis (construcción del observador) y las mediciones experimentales (vínculo del sistema teórico con la realidad). En tanto la experiencia cambia, en tanto se accede a otras lógicas valoradas desde los principios racionales, los principios no se abandonan, se amplían, como el carácter absoluto que admite la probabilidad termodinámica como un absoluto.

CAPÍTULO 3. LA TENSIÓN ENTRE PRINCIPIOS RACIONALES EN LA EMERGENCIA DE UNA NUEVA FORMA DE VER EL MUNDO

La imagen práctica del mundo que cada uno de nosotros lleva dentro de sí no posee carácter definitivo (...). La imagen científica del mundo (...) es forjada en un proceso de permanente cambio y perfeccionamiento.

Max Planck

En la conferencia *Sentido y límite de la ciencia exacta*, Planck muestra que la imagen sobre el mundo, la que elabora el individuo –sea o no científico– desde la experiencia cotidiana, es dinámica, está en permanente cambio, en vía de perfeccionamiento. Es precisamente éste el sentido que se rescata del trabajo de Planck como científico, su imagen sobre el comportamiento de la naturaleza y su manera de explicarlo se vieron afectadas por la tensión entre los principios racionales que orientaron su quehacer. Las ideas que expresa Planck en esta conferencia son muestra del cambio que sufrió en la manera de ver el mundo. Planck consideraba que la labor del científico era formarse una imagen única de la naturaleza, encontrar una imagen que no cambiara, pero el trabajo científico le mostró que no podía ser posible. Es así que para 1941, cuando ofrece esta conferencia, Planck hace referencia a la necesidad de un relevo “amargo” de una cosmovisión por otra, cuando frente a un hecho novedoso la imagen del mundo, desde la cual se da razón a los acontecimientos, no ofrece explicación y, en cambio, hay una fuerza de orden teórico –una nueva cosmovisión– que sí lo hace. Y aclara: “la nueva visión del mundo no suprime la antigua” (Planck, 2000b:81- 87).

Planck tuvo que pasar por un periodo de cuestionamientos sobre la manera como debía concebir el comportamiento de los fenómenos que estaba estudiando. El problema del cuerpo negro no sólo puso a prueba las teorías físicas, que se creían completas, sino que le llevó a aceptar el carácter probabilístico de la entropía y a plantear la hipótesis del *cuanto de acción*. Como consecuencia, Planck se dio a la tarea de revalorar la teoría estadística propuesta por Boltzmann y otorgar a la

probabilidad la calidad de absoluto. Es en este sentido que como consecuencia de la tensión absoluto–probabilidad emergió una nueva forma de definir una de las magnitudes absolutas de la naturaleza –la entropía– y dar validez a uno de los métodos desde el cual se podía dar razón del comportamiento de la naturaleza –el cálculo de probabilidades–, esto sin que dejara de tener validez la visión mecanicista, ni las leyes que hasta el momento daban una imagen del mundo.

3.1 Emergencias de la tensión absoluto–probabilidad

La tensión entre principios racionales es una actividad intelectual en la que el investigador evalúa sus preguntas; cuestiona sus estrategias para abordar un objeto de estudio y los modelos que utiliza para hacerse una imagen de la naturaleza; elabora hipótesis y busca la manera de justificarlas, o desecharlas, dentro de su explicación con la confrontación de datos teóricos y/o empíricos; etcétera. Con esto el investigador está haciendo nuevas consideraciones sobre su objeto de estudio, en una nueva lógica envuelve las fuerzas que generan la tensión y da sentido a la explicación que se realiza sobre un nuevo campo de estudio. En el caso de Planck, la definición de la entropía como una magnitud que depende de un cálculo probabilístico, involucra la dualidad macro–micro (visión macroscópica, visión microscópica, macro estado, micro estado) como el campo de estudio en el que es posible, a partir del comportamiento microscópico de un sistema, dar cuenta de la irreversibilidad de los procesos macroscópicos. Esto da muestra que la tensión modifica, por un lado, la forma como se considera el fenómeno: cambio ontológico de lo estudiado –en este caso la entropía–; por otro lado modifica el método utilizado para dar cuenta de la naturaleza, específicamente de un sector de la naturaleza que no se encontraba en la imagen que se tenía de ésta –el comportamiento probabilístico de lo microscópico–; y con ello, la tensión modifica al investigador: las preguntas que formula, las relaciones que establece, las hipótesis que plantea, etcétera.

El trabajo realizado por Planck abrió las puertas a un nuevo campo de explicación científica que implica la integración de lo microscópico en la explicación de lo

macroscópico; donde adquiere sentido la probabilidad termodinámica como una cantidad con validez universal, que guarda una relación fija con una magnitud física y que tiene sentido en la explicación de los fenómenos físicos; campo en el que es posible explicar fenómenos que tienen seguimiento en el laboratorio –como la radiación de cuerpo negro–. Esto no significó que Planck aceptara totalmente las consecuencias de admitir la mirada estadística sobre el comportamiento de la naturaleza; como se mostró en el primer capítulo, en el *Tratado sobre la radiación de calor* publicado en 1914, Planck no admitía que la probabilidad termodinámica condujera a una causalidad probabilística, no podía admitir que relaciones causa–efecto fueran sólo probables, la única causalidad que da cuenta del comportamiento de la naturaleza es la causalidad clásica que da cuenta de un “universo estrictamente gobernado por leyes”.

De aquí que como resultado de la tensión absoluto–probabilidad haya emergido una nueva forma de ver el mundo, que no implicó un cambio total de cosmovisión, ni el desprendimiento y abolición del principio que guió a Planck desde el inicio de su trabajo –lo absoluto–, puesto que no abandonó el valor explicativo de los principios absolutos sino que amplió su noción. Razón por la que, en las primeras páginas de este trabajo, se apoyara la idea de Labastida (2007:215) sobre los cambios en la ciencia, considerados como continuos, graduales, sin saltos súbitos; dado que en los periodos de tensión entre principios racionales, el investigador confronta las consecuencias de las teorías que se fundamentan en la tradición científica en la que se desenvuelve con otras que se salen de sus principios racionales, así el resultado es la ampliación de las teorías, del campo de investigación, de los métodos que permiten hacer la descripción del objeto de estudio.

Si el periodo de tensión coincide con momentos de crisis de una disciplina científica no es necesario que sus emergencias coincidan; como sería el caso de la tensión absoluto–probabilidad en Planck desde la que emerge el *cuanto de acción* y con ello la crisis de la física clásica. El resultado de la crisis es la consideración, por parte de la comunidad científica, de nuevos aspectos de orden teórico, experimental, epistemológico que conllevan a un cambio de paradigma; el resultado es una revolución científica. Según Kuhn (2006:165), en este periodo de la ciencia el investigador, como miembro de la comunidad científica, se ve en la necesidad de reevaluar las nuevas alternativas que se plantean sin desprenderse del paradigma en

el que se planteó la crisis. Igualmente, en este ámbito del cambio en la ciencia el tránsito es continuo, gradual, sin saltos.

Por su parte, el resultado de la tensión entre principios racionales es el cambio en la cosmovisión del investigador, no es una revolución. En el caso de Planck, por ejemplo, la tensión no dio como resultado la aceptación del *cuanto de acción* en la imagen de la naturaleza, en otras palabras, no cambió de paradigma; por esto algunos concedores de su obra, como Lozano (2001) por dar sólo un nombre, lo consideran como revolucionario a pesar de sí mismo. Planck al respecto opinaba lo siguiente:

Una importante innovación científica raramente se abre paso gradualmente entre sus oponentes, convirtiéndolos (...). Lo que sucede es que sus oponentes gradualmente mueren y la nueva generación está familiarizada con la idea desde el principio. (Planck, 1963:97)

En este sentido, el proceso de investigación, de difusión de resultados, de debates científicos, del trabajo académico, es lo que permite el cambio de paradigma. Reconociendo que la única relación que guardan la tensión entre principios racionales y las crisis científicas es que conllevan a procesos donde ideas consideradas dentro de una teoría se revalúan, se cuestionan, se amplían con otras no valoradas. En este punto es necesario definir cómo es el cambio que emerge de la tensión, particularmente de la tensión absoluto–probabilidad en Planck.

Hay dos niveles en la mirada de Planck sobre el comportamiento de la naturaleza: uno, la imagen de unidad de la naturaleza que se obtiene si se conocen las leyes que describen su comportamiento, es decir, hay una estructura que permanece, que es propia de la naturaleza, *a priori* del trabajo del investigador. El otro nivel, hace referencia a la lógica desde la que se formulan las leyes –fue lo que cambió en la mirada de Planck–, ésta engloba lo macro y lo micro en una sola diada; Planck, al aceptar la hipótesis del caos molecular de Boltzmann, otorga a la probabilidad la función de explicar el comportamiento de las partes microscópicas de los sistemas que generan los cambios observados macroscópicamente.⁶¹

⁶¹ Estos niveles en la mirada de Planck corresponden a la postura realista que sostiene sobre el conocimiento científico. Planck (1961:84) sostuvo que existen dos teoremas que dirigen la estructura de la ciencia física: “1) hay un mundo real externo que existe independientemente de nuestro acto de conocer; 2) el mundo real externo no es directamente cognoscible”. Entonces, cada nivel de la cosmovisión de

Entonces si el primer nivel en la mirada sobre la naturaleza permanece en Planck, su concepción realista no cambia, ni se separa del mecanicismo. Lo que cambia es la manera como el científico elabora, para sí mismo, una imagen de la naturaleza; que corresponde con el segundo nivel. En tanto la experiencia cambia, en tanto la lógica que está a la base de las explicaciones de los fenómenos naturales se amplía, los principios racionales no se abandonan; por ser principios de experiencia, el cambio consiste en admitir nuevas lógicas para elaborar una explicación, lo que para Planck sería el perfeccionamiento de la imagen del mundo.⁶²

Se considera, entonces, que las teorías son las que pierden el carácter absoluto, no así las leyes que dan cuenta del comportamiento de la naturaleza. Mientras el investigador se encuentre en estado de tensión de sus principios racionales, los enunciados de la tradición científica en la que se ha desenvuelto adquieren un carácter hipotético, de manera que es posible considerar que la imagen científica del mundo es forjada en un proceso de permanente cambio. Entonces de la tensión no sólo emerge un cambio de carácter ontológico y de método, sino también da paso al carácter hipotético de las teorías. Es desde estos puntos que se afirma que de la tensión absoluto–probabilidad emergió un cambio en la cosmovisión de Planck.

3.2 Consideraciones ontológicas y de método emergentes de la tensión absoluto–probabilidad

La validez universal, la relación entre la entropía y la probabilidad, así como el sentido físico de la probabilidad, son considerados como los aspectos que definen la tensión

Planck se corresponde con uno de los teoremas, y dada la postura epistemológica, sólo el acto de conocimiento del sujeto es el que permite hacer una imagen del mundo real y, por tanto, es ésta la que se altera durante el proceso de tensión.

⁶² La emergencia de una nueva forma de ver el mundo dado por la tensión entre principios racionales, dista de la que surge de las revoluciones científicas. Las revoluciones traen como consecuencia un cambio en la tradición de la ciencia normal que exige una reeducación de la percepción que tiene el científico y que el mundo que investiga sea incommensurable con el que estudiaba en el anterior paradigma (Kuhn, 2006:213). Por su parte la tensión es un proceso que realiza el científico que conlleva una reevaluación de la manera como realiza la explicación de los fenómenos físicos, que no conlleva a un cambio de mundo, por tanto no se considera en este proceso la reeducación de la mirada, debido a que no hay un cambio de paradigma, no hay un cambio de compromisos.

absoluto–probabilidad. Como resultado de la tensión, la definición de la segunda ley termodinámica en términos de la direccionalidad de los procesos hacia estados de equilibrio, donde la magnitud de la entropía es mayor, se reformuló: los cambios en la naturaleza siempre proceden de estados de probabilidad baja a estado de probabilidad alta; con esto, el estado más probable desde una mirada macroscópica de los procesos correspondía al estado de equilibrio, mientras que desde la mirada microscópica correspondía a la configuración más probable de las moléculas que componen el sistemas, configuración en el que todos los estados de movimiento de las moléculas son igualmente probables: el caos molecular.

Bachelard (2005:31) afirma que encontrar una lógica que englobe a la física macroscópica y a la física microscópica implicaría quitar énfasis a los principios como estructura y considerarlos en su función. Con el resultado de la tensión en Planck los principios absolutos son definidos en cuanto a su función, por esto la probabilidad amplía la noción de absoluto (como principio racional) y no anula la función de los absolutos en la consideración de una imagen que se aproxime a la naturaleza tal cual se presenta. De modo que de la tensión en Planck emergieron consideraciones sobre la imagen de la naturaleza que no habían sido contempladas, en tanto que no se tenía conocimiento del campo de explicación donde lo macro y lo micro no fueran características excluyentes. Entonces es necesario pensar que esta emergencia lleva consigo cambios en la manera como se conciben las magnitudes que describen la naturaleza, como la entropía. Estos cambios podrían considerarse en el ámbito de la ontología, que corresponde al segundo nivel en la mirada que hace Planck a la naturaleza, ya que cambian las consideraciones sobre lo que es esta magnitud.

Siguiendo a Nicol (1965:18), los conceptos cardinales de la física clásica conservan un significado ontológico, que al tratarse de eliminar, justificándolos únicamente en un sistema simbólico de representaciones funcionales, abren una brecha entre el sistemas de leyes y la realidad que se pretende representar; puesto que, como lo explica más adelante (Nicol, 1965:43), el conocimiento científico implica, tanto, una relación epistemológica entre el sujeto que conoce y el objeto de la realidad que es conocido, como una relación que involucre el ser del objeto y el ser del sujeto. En otras palabras, e involucrando el realismo desde el que se fundamentó el trabajo de Planck, si las leyes universales, los absolutos, son el medio por el cual el investigador

se hace una imagen única de la naturaleza entonces guardan una relación de carácter ontológico que vincula la realidad con la imagen.

La tensión absoluto–probabilidad no dio como resultado único el cambio de la ecuación que definía la entropía, no sólo fue la admisión de una función probabilística en la definición de esta magnitud, no fue un cambio de orden simbólico;⁶³ la entropía vinculada a una ley universal implica el vínculo entre la imagen que se puede tener de los procesos físicos y la realidad de los procesos en la naturaleza. De la tensión emergió la entropía como una cualidad de los sistemas, es una magnitud que indica el estado en el que se encuentra el sistema y las posibilidades de cambio que puede seguir, ya sea desde una mirada macroscópica o microscópica. El ser de la entropía reside en la posibilidad de definirse desde una u otra mirada, pero lo esencial es que permite establecer el vínculo entre ellas. Así esta magnitud, como resultado de la tensión, no es en sí misma, es en tanto se establece un vínculo entre dos lógicas, consideradas como excluyentes, a saber, la lógica de lo macroscópico y la lógica de lo microscópico, que llevan a hacerse una imagen del comportamiento de la naturaleza. Es en este sentido, que la representación simbólica tan sólo es una parte de la definición de la entropía, pues su sentido obliga a pensar en la manera como éstas dos lógicas se vinculan en una sola forma de considerar los fenómenos físicos.

La diada macro–micro que configura la manera de entender la naturaleza, y así hacer una imagen de ella, se reconoce en el tratamiento que desarrolló Planck para definir la irreversibilidad de los procesos naturales. Desde esta consideración la entropía, entendida como una cualidad de los sistemas naturales, abre la posibilidad de considerar el comportamiento microscópico de la naturaleza como explicación de los procesos macroscópicos. Para llegar a este punto fueron necesarias las consideraciones teóricas y experimentales del trabajo de Planck: la hipótesis del caos molecular y la definición de la probabilidad de los estados de un sistema, las cuales tuvieron un impacto directo en la cosmovisión de Planck.

⁶³ La entropía desde la descripción macroscópica de los fenómenos queda definida como $dS=Q/T$, donde S representa la entropía del sistema en estudio, Q indica la cantidad de calor absorbido o cedido al medio durante dos estados del sistema durante el proceso, y T representa la temperatura en la que se desarrolló el proceso. Desde la definición probabilística, la función $S=k\log W$ define la entropía, donde k es la constante del Boltzmann y W representa la probabilidad termodinámica de los microestados del sistema.

Cuando la hipótesis del caos molecular, es admitida por Planck en la explicación de los fenómenos térmicos de los gases, se destacan dos de los aspectos que resultan de la tensión: por un lado, da cabida a las hipótesis especiales sobre la constitución de la materia y las condiciones iniciales de los procesos como una forma de acceder a la explicación de los fenómenos desde la mirada microscópica y, por otro lado, da sentido físico a la probabilidad en la definición de los absolutos. La posibilidad de dar cuenta del comportamiento microscópico de la materia, con estos dos aspectos, repercuten en la imagen universal de la naturaleza, en la que Planck confiaba, pues a pesar de no tener el conocimiento preciso del estado (mecánico, térmico, eléctrico, etc.) de cada molécula de los gases, como se requeriría desde la lógica macroscópica, con la probabilidad, concepto de la lógica microscópica, era posible describir el resultado del devenir del sistema completo.

Ahora, con la descripción de los procesos físicos en términos de los estados más probables del sistema al transcurrir el tiempo, es decir, con el vínculo entre la entropía y la probabilidad en la definición del principio de aumento de entropía, Planck debió establecer la relación entre las descripciones macroscópicas y las descripciones microscópicas de los procesos. La definición de la entropía llevó a que la imagen de la naturaleza contara con la siguiente relación: el estado más probable macroscópicamente es el equilibrio, estado que, desde una mirada microscópica, indica una distribución de estados igualmente probables. Esta relación simultáneamente le otorga al aumento de entropía la calidad de ser absoluto, esto es: que desde la probabilidad termodinámica define los cambios macroscópicos en la imagen de la naturaleza, en términos de Planck (1915:44): “el misterio de la preferencia de la naturaleza [por ciertos estados en un proceso] desaparece”. Así la entropía es la magnitud que le permite al hombre hacerse una imagen más cercana a la naturaleza, no sólo de los procesos que macroscópicamente quedan registrados en los laboratorios sino también de los procesos a nivel molecular.

El caos molecular, como hipótesis que debe ser confirmada para que los procesos macroscópicos cumplan con la segunda ley termodinámica –o principio del aumento de entropía– (Planck, 1914:121), es el elemento de carácter conceptual que, resultado de la tensión, tiene una influencia en el carácter ontológico de la entropía y en el cálculo de probabilidades. Con la consideración reduccionista de explicar los fenómenos

macroscópicos desde los promedios de las cantidades que definían el estado dinámico de las moléculas (como la velocidad) era imposible pensar en la manera de determinar una magnitud que, como la entropía, definía un principio absoluto en la naturaleza. El caos molecular, como es asumido por Planck, permite que no sea necesario conocer específicamente el estado dinámico de cada molécula que compone un gas, por ejemplo, sino que da cuenta de distribuciones probables dentro del sistema. Entonces, con la magnitud de la entropía Planck da cuenta del comportamiento microscópico de la naturaleza en términos de distribuciones, según Reichenbach (1955:194) distribuciones regulares; lo que significa que, como resultado de la tensión, Planck asumió el riesgo que traía aceptar un método estadístico y la probabilidad como principio racional: no tener respuesta a todos los detalles de las operaciones físicas (Planck, 1960:16), aunque luego, dada la tensión absoluto–probabilidad, se sumó un nuevo aspecto: la posibilidad de considerar los procesos microscópicos y macroscópicos desde una única magnitud: la entropía.

Con estos elementos, la lógica emergente de la tensión absoluto–probabilidad que envuelve la explicación de los fenómenos macroscópicos y microscópicos, se caracteriza por dos aspectos: uno, son los términos desde los cuales se hace referencia a los fenómenos y, el otro, la manera como son abordados –la manera como se razona sobre ellos–.

Respecto al primer aspecto, cuando la entropía se define como cualidad de los sistemas y la segunda ley como la condición para considerar los procesos como reversibles o irreversibles y como macroscópicos o microscópicos, se atribuye a la imagen de la naturaleza una característica propia de los procesos que se dan en ella: la entropía, ya no sólo como una magnitud calculada desde la probabilidad matemática ó como el promedio de otras magnitudes, sino como una cualidad en sí que se caracteriza con un número asignado por la probabilidad de los microestados.

Por otro lado, respecto a la manera como se da cuenta de los procesos se encuentra que al incluirse el caos molecular como la forma para dar sentido físico al cálculo de probabilidades, se añade un método para dar cuenta de los procesos: encontrar las distribuciones probables del estado del conjunto de moléculas que componen el sistema. Así, en la lógica macro–micro emergente de la tensión, no se

hace el seguimiento de cada elemento microscópico, sino que se considera el comportamiento del conjunto de elementos, y el seguimiento del proceso macroscópico puede realizarse desde la consideración del equilibrio como el estado al que tienden los procesos físicos dado que microscópicamente hay una tendencia al caos molecular. Con esto, la tendencia de los estados de un sistema no se explica desde la voluntad de la naturaleza sino desde la relación de probabilidad de los estados macroscópicos y microscópicos.

Ahora, ¿qué repercusiones tuvo la definición de la entropía, desde la lógica macro–micro en la cosmovisión de Planck? Heilbron (1986:20) afirma que “Planck llegó a ser un entusiasta atomista” dada la “conversión” al utilizar el punto de vista de Boltzmann sobre la definición de la entropía. Y se confirma en las palabras que Planck pronunció en 1914 en la Universidad de Berlín, cuando era rector de la misma:

En la mente del físico (...) ya no puede existir duda (...) de que la materia está constituida de átomos, que el calor es movimiento de moléculas, y que la propagación del calor, como todos los demás fenómenos irreversibles, obedecen, no a leyes dinámicas, sino a leyes estadísticas, esto es, a leyes probabilísticas. (Planck en: Sánchez, 2005:149)

De modo que la definición de la entropía como resultado de la tensión dio como emergencia en Planck, particularmente, la ampliación de la imagen que tenía de la naturaleza, lo que no implicó renunciar a la imagen que hasta el momento había conseguido desde el mecanicismo. En este punto merece atención un llamado que realiza Sánchez (2005:149) al mencionar el discurso de Planck, que se acaba de citar: cuando Planck hace referencia a leyes dinámicas está dirigiendo la atención a “leyes en que la causalidad era la clásica, la que caracteriza, por ejemplo, a la dinámica newtoniana”. Lo cual significa que la definición del principio del aumento de entropía, desde la definición de la entropía como función de la probabilidad termodinámica, implicó hacer una reevaluación de la causalidad.

Por tanto, cuando Planck define la probabilidad termodinámica, no sólo da cabida a un nuevo método para describir la naturaleza: el cálculo de probabilidades, sino que también implicó pensar el determinismo que tenían implícitas las leyes universales de la naturaleza. Así la expresión, desde la que se definió la ley del aumento de entropía: los cambios en la naturaleza siempre proceden de estados de probabilidad baja a

estado de probabilidad alta, implicaba que las relaciones causales desde las que se definían los estados de un sistema tuvieran el carácter de probabilidad. Es entonces necesario hacer una revisión sobre la manera como la causalidad fue revalorada dentro de la cosmovisión de Planck.

3.2.1 La causalidad en la tensión absoluto–probabilidad

En el campo contingente del trabajo de Planck, se encuentra la exigencia determinista desde la que realiza explicaciones sobre los fenómenos naturales, de manera que no es posible hacer una consideración teórica que se salga de dicho campo, a pesar de que exista la dimensión temática o el pensamiento divergente. Es decir, la actividad racional de la construcción de una imagen de la naturaleza no se desvincula en ningún momento del campo teórico en el que tiene lugar la tensión entre principios racionales, y no se cambia como resultado de la tensión. Planck nunca pone en duda la correspondencia causal de los fenómenos naturales, ni de orden macroscópico ni de orden microscópico; pues la lógica que engloba estas dos miradas no se sale de los planos en los que Planck realiza su investigación, que corresponden al realismo y al mecanicismo. Esto se correspondería con lo que Holton denomina como la fidelidad temática,⁶⁴ es decir, a pesar de que existen hechos que contradicen aspectos del marco desde el cual el investigador realiza su actividad, se busca una explicación que se enmarque en el plano contingente y que responda a la dimensión temática. Por ejemplo, la explicación causal clásica pareció peligrar en el siglo XIX con la introducción de la teoría cinética de los gases, debido a que una “forma de entender los casos de orden simple era pensar que fuesen resultado de un caos subyacente” (Holton, 1982:38), es decir, que los procesos de equilibrio se debían al caos molecular; sin embargo Planck no pone en duda que exista una causalidad que explique el nivel microscópico de la naturaleza. Así la causalidad (el determinismo) sigue siendo uno de los aspectos en los que se enmarcan las explicaciones que realizó Planck resultantes de la tensión absoluto–probabilidad.

⁶⁴ Holton (1982:40-41) afirma que la dimensión temática del quehacer del científico puede ejercer control sobre el científico y la comunidad, de tal manera que la fidelidad temática perdura notablemente. Sin embargo, algunos científicos que se han adherido a un tema pueden sin obstáculo adherirse al tema opuesto, como se ejemplificó con la tensión entre principios racionales de Planck en el segundo capítulo.

Al respecto Nicol (1997:146) hace referencia a la manera como Maxwell, quien adoptó el método estadístico en la teoría cinética de los gases, no renunció a la causalidad al optar por un nuevo método que le obligó a abandonar la descripción del movimiento de cada molécula. Desde el modelo mecánico es imposible predecir el estado de movimiento de *una* partícula, que compone un gas, en un momento futuro; sin embargo, con la teoría de probabilidades es posible predecir cuántas se moverán dentro de ciertos límites fijos de velocidad;⁶⁵ por lo que concluye:

La probabilidad no afecta a cada movimiento individual, sino a nuestro conocimiento del conjunto constituido por un gran número de movimientos individuales. La probabilidad por consiguiente, sigue siendo un concepto de orden epistemológico o metodológico, no del orden causal u ontológico. (Nicol, 1997:148)

Es en este sentido que se entiende el pronunciamiento de Planck en la Universidad de Berlín, puesto que una explicación ubicada, ya sea, en la causalidad dinámica –clásica– o en la causalidad estadística, no excluye que los fenómenos observados macroscópicamente o microscópicamente tengan una causa. Las relaciones causales son necesarias dentro de la lógica de la investigación en Planck, sin importar el método que se utilice, para tener la imagen de la naturaleza. Por esto en 1930 se preguntaba:

¿Es válido, como se creía antes, el principio de causalidad, en toda su fuerza, para todos los sucesos físicos? ¿O tiene únicamente significado sumatorio y estadístico cuando se aplica a pequeños átomos? [Su respuesta fue:] En su tentativa de construir una imagen hipotética del universo externo, el físico puede o no, (...) basar su síntesis sobre el principio de una estricta causalidad dinámica o adoptar tan sólo una causalidad estadística. Lo más importante de la cuestión es saber hasta qué grado se avanza por uno y otro camino (...). En la práctica se elegirá (...) aquel que prometa ser más satisfactorio en sus resultados lógicos. (Planck, 1961:104)

El carácter que recibe la entropía desde su definición probabilística y el cálculo de probabilidades como método para definir los absolutos de la naturaleza, implican que la categoría de causalidad permanezca en la explicación de los fenómenos físicos, sean considerados macroscópicamente o microscópicamente. Esta es otra de las razones por las que el cambio en la manera de ver el mundo en Planck no implicó un cambio de

⁶⁵ Al respecto Reichenbach (1955: 194-195) afirma: “Junto a la causalidad como *principio del enlace regular*, se presenta el principio de probabilidad como *principio de la distribución regular*”. Y continúa: “El principio de probabilidad significa, por lo tanto, una suposición acerca del residuo irracional de todo acontecer, mientras que el principio de causalidad representa un supuesto sobre los factores racionales; ambos principios, a la vez, determinan el acontecer natural”.

mundo, la naturaleza de la que pretende hacerse una imagen se corresponde con el enlace regular de eventos, el carácter determinista de las leyes es una de las características que tienen las leyes universales, de manera que la ley del aumento de entropía brinda el carácter regular de los procesos en la naturaleza –los cambios se dan de estado de probabilidad baja a estados de probabilidad alta–, así que es posible que el físico prevea que en un proceso, el estado que precede a otro esté más cercano al equilibrio –ó caos molecular–.

3.3 El carácter hipotético de las teorías como emergencia de la tensión absoluto–probabilidad

En 1908 Planck realizó la conferencia titulada *La unidad del universo físico*, en la que expuso la manera como en el transcurso de la historia de la física, diferentes esfuerzos por conseguir una imagen de la naturaleza dieron como resultado teorías, métodos y datos que han cambiado y que no han logrado conformar una unidad; por lo que afirmó:

Los grandes maestros de las investigaciones exactas rechazaron ideas de la ciencia (...) se armaron para la guerra contra opiniones heredadas e impuestas (...) ellos fueron movidos por sus creencias fijadas en la realidad de su imagen. (Planck, 1960:25)

De manera que la búsqueda de una imagen de la naturaleza, realizada por el científico, ha llevado a la evaluación permanente de las leyes y teorías, actividad que debió realizar Planck al definir la ley del aumento de entropía como un principio absoluto. Si bien las teorías hasta el momento no son únicas ni permanentes, cuando Planck realizó su actividad investigativa pretendió encontrar una teoría que fuera universal, pero reconoció que el resultado de su trabajo, como el de sus colegas, sólo tenía validez momentánea o parcial. La teoría puede adquirir un carácter hipotético en el momento que los resultados obtenidos en los laboratorios de los físicos experimentales o en las pizarras de los físicos teóricos cuestionen las características que determinan el comportamiento de la imagen que se tiene de la naturaleza. Esto no se pone en duda, considerando los principios racionales que orientaron el trabajo de

Planck –lo absoluto y la probabilidad–, la búsqueda de los absolutos implicaba formular teorías que se aproximaran cada vez más al comportamiento de la naturaleza.

Admitir que en algún momento de la investigación científica las teorías tienen un carácter hipotético es resultado de la mirada de la ciencia que tiene el investigador. La ciencia se concibe entonces como un sistema abierto, cambiante, histórico, se caracteriza por la actividad dinámica de sus búsquedas, explicaciones, cuestionamientos, en la que la hipótesis teórica es el punto de partida de un nuevo esquema teórico (Nicol, 1965:26). En este sentido, cuando Planck encontró en la termodinámica la teoría más apropiada para hacerse una imagen de la naturaleza, depositó en sus resultados la verdad definitiva e inmutable en la que se fundaba la física, en particular. Sin embargo, la búsqueda de los absolutos le permitió reconocer que más allá de las teorías que definían los fenómenos según su naturaleza (mecánica, eléctrica, térmica, magnética, etcétera) existían leyes universales que daban cuenta de cualquier fenómeno. Planck al encontrar el aumento de entropía como un absoluto, reconoció el valor que tienen las teorías como una de las formas – más no la única– de concebir la naturaleza.

El resultado de la tensión, en los principios racionales que orientaron el quehacer de Planck, no sólo definió un campo teórico en el que la mirada macroscópica no se contraponen a la mirada microscópica, también resaltó una manera de involucrar al investigador dentro de la realidad que estudia. Es decir, la imagen de la naturaleza está definida en tanto el sujeto reconoce la manera de involucrarla en la explicación de los fenómenos y la expone a la presión que ejercen hechos, inicialmente aislados, y recursos metodológicos no concebidos; ejemplo de esto el problema del cuerpo negro y el cálculo probabilístico en la definición de magnitudes físicas, respectivamente. De modo que el carácter hipotético de las teorías se otorga en cuanto el investigador se hace artífice de la actividad de hacer una imagen de la naturaleza y con ello elaborar explicaciones de los fenómenos. En este sentido, Planck, al analizar el procedimiento que realizó para resolver el problema de la radiación de cuerpo negro, escribió:

Pero este resultado no representa más que un avance de preparación hacia el ataque contra el principal problema que se erguía en toda su imponente altura. El primer intento de dominar el fracaso. (Planck, 1922:5)

Al finalizar el siglo XIX, el edificio de la física parecía completo, podía describirse y explicarse cualquier fenómeno desde las leyes que se tenían; eran leyes que no podían conjugarse, eran independientes, se realizaba un análisis de los eventos separando cada efecto de acuerdo a su naturaleza. Por esto con la intención de hablar de *una* naturaleza, los mecanicistas encontraron en sus modelos dinámicos la manera de integrar la explicación de todos los fenómenos, así como los energetistas redujeron la explicación al principio de conservación de la energía y, por su parte, Planck optó por los absolutos. Sin embargo para mecanicistas y no mecanicistas la radiación de cuerpo negro se convirtió en un problema que les llevó a evaluar las teorías desde las que se diera explicación. Planck por su parte, no sólo evaluó las teorías físicas sino que encontró en el trabajo de enfrentar principios racionales opuestos la manera de definir un principio absoluto y resolver un problema. El aumento de entropía como principio absoluto, resultado de la tensión absoluto–probabilidad, no resultó ser un fracaso de la actividad científica; caso opuesto a los resultados de la resolución del cuerpo negro, puesto que no sólo implicaba el carácter hipotético de las teorías sino una revisión del comportamiento de la naturaleza.

El carácter hipotético de las teorías implicado particularmente en la tensión absoluto–probabilidad se caracterizó por el reconocimiento de dos teorías desde las cuales se buscaba dar significado a la entropía: la teoría termodinámica y la teoría cinética expuesta por Maxwell y Boltzmann, donde se albergaban los principios racionales que Planck enfrentó: lo absoluto y la probabilidad. La conjugación de estas dos teorías, sobre el comportamiento de los gases frente a los procesos termodinámicos, fue la principal acción que realizó Planck para dar sentido físico a la definición de la entropía y encontrar el principio de aumento de entropía en los procesos físicos como un absoluto. Al respecto Planck consideró que la búsqueda de *la* imagen de la naturaleza está cruzada por el trabajo simultáneo, sobre necesidades prácticas correspondientes a los problemas científicos, realizado de diferentes formas por los científicos; de manera que:

Con frecuencia, surgen varias teorías situadas unas junto a otras, que inicialmente se desarrollan completamente independientes entre sí, y sólo después, cuando cada una de ellas se desarrolla y perfecciona, comienzan a entrar en contacto entre sí, y en dependencia de las circunstancias, se apoyarán unas a otras o comienzan a luchar (...) por lo que deben llegar a una modificación mutua, para hacerlas conciliables entre sí. En esta adaptación mutua está el germen de su

ulterior florecimiento y desarrollo en el camino hacia una unidad superior. (Planck en: Academia de ciencias... 1985:359)⁶⁶

Analizar la forma en la que Planck vio el mundo como resultado de la tensión absoluto–probabilidad implica identificar la consideración que tuvo sobre los resultados de la ciencia y sobre su propósito, después de definir la entropía. Se ha mencionado que Planck se mantuvo en la posición realista sobre el conocimiento de la realidad; razón por la que en sus trabajos realizados durante el periodo de tensión, así como posteriormente, se encuentre el valor hipotético que Planck le atribuyó a las teorías: éstas tienen la característica de cambiar de acuerdo a los cuestionamientos del investigador, de acuerdo a los resultados de su actividad científica. El carácter hipotético de las teorías surge del enfrentamiento entre teorías, en otros términos, es resultado de la tensión entre los principios que orientaron cada una de las teorías. Mientras que el propósito del quehacer científico no cambió, siempre fue para Planck: encontrar *la* imagen de la naturaleza, encontrar una “unidad superior” de la naturaleza. Por tanto, los absolutos fueron la única manera de tener elementos permanentes de la imagen.

En resumen, de la tensión entre principios racionales emerge la necesidad de confrontación de teorías y la revisión permanente de los resultados de la actividad científica. La tensión actualiza el conocimiento que el hombre tiene sobre su entorno, desde la ciencia, redefiniendo tanto el objeto de conocimiento como lo que se conoce de él. Así la emergencia de la tensión tiene influencia directa en el ámbito epistemológico, se impacta en el objeto de estudio, en la imagen que se tiene de éste y en la manera como se estudia.

⁶⁶ Este fragmento corresponde al artículo titulado: *Relaciones mutuas entre las teorías físicas*, escrito por Planck, respecto al principio de correspondencia enunciado por Niels Bohr en 1913. Este principio indica la existencia de un límite entre teorías que sirve como guía heurística para construir modelos y teorías; por ejemplo Bohr mencionó que era posible solucionar “las dificultades más notorias [de la teoría cuántica] intentando cruzar una analogía lo más estrechamente posible entre la teoría cuántica y la teoría ordinaria de radiación” (Bohr en Sánchez, 2005:323).

3.4 Consideraciones sobre el investigador en la emergencia de la tensión absoluto–probabilidad

La tensión entre principios racionales al ser definida como una actividad intelectual implica la relación dinámica y estrecha que existe entre el investigador y el objeto a investigar ó, en términos de Nicol, la relación entre el ser del objeto y el ser del sujeto. En tanto se definen las fuerzas que generan la tensión absoluto–probabilidad en Planck, se explicitan los aspectos que definen la tensión y se encuentra un sentido físico a las diadas: macro–micro y absoluto–probabilidad en la imagen que se elabora de la naturaleza, entonces se define la correspondencia de cambios tanto del objeto de la investigación: la entropía, como del investigador: Planck.

Al respecto Labastida (2007:225) afirma que el científico en el proceso de construcción de métodos y sistemas teóricos se ha construido a sí mismo; en tanto el lenguaje de la ciencia y el científico –quien lo enuncia– tratan de coincidir con el objeto de estudio, que en cierto sentido, han creado y transformado, se ve avocado al cambio. Es en este sentido, que al enunciarse que la ciencia es histórica porque tiene un elemento de creación que depende de los fenómenos que fueron base para su formulación y de la evolución del pensamiento del científico, se ve la necesidad de encontrar en la emergencia de la tensión al investigador. Pues al considerarse cambios en la ontología del objeto de estudio y en la manera de abordarlo, el sujeto que realiza y enuncia este proceso sufre cambios en la manera de describir la imagen de la naturaleza que elabora (en términos de Planck) y, también, en la manera de realizar su quehacer.

La conjugación del plano contingente y divergente de la actividad científica, en la tensión entre principios racionales, implica que se cuestionen los modelos que fundamentan la explicación de los fenómenos naturales, así como las inquietudes e intereses que guían el quehacer particular del investigador. Es en esta medida que el sujeto que investiga cobra particular importancia al momento de revisar los resultados de su tensión. Se afirmó que los principios racionales son las directrices del trabajo del investigador, de tal manera que el propio investigador al incidir en ellos –al cambiarlos– altera el sentido de sus esquemas de interpretación, ya que reconoce y explica nuevas

relaciones en la realidad que investiga, indaga con nuevos cuestionamientos, utiliza otras formas de representación, etcétera. Entonces, así como hay cambios ontológicos en las construcciones conceptuales que son parte de la imagen de la realidad que estudia, también hay cambios en el investigador que sufre la tensión.

En el caso particular de la tensión absoluto–probabilidad, Planck tiene que reconocer la importancia de las hipótesis, de la imagen microscópica de la naturaleza, de la probabilidad en la descripción de la naturaleza, de la inclusión de nuevas lógicas que permitan hacer una explicación de la naturaleza, así como darle importancia en la actividad científica a la confrontación de concepciones contrarias, a las decisiones desesperadas que toma el científico sin justificación inicial, da lugar a las ideas catalogadas de irracionales desde la tradición científica, entre otros aspectos que resultan de cualquier actividad humana. Al respecto, Planck discurre, en su libro *¿A dónde va la ciencia?*, la manera en la que el científico, como hombre, se ve necesariamente ligado a elementos que no caben dentro de la ciencia positiva, pero que determinan gran parte de los resultados de la investigación:

El hombre que no puede imaginar sucesos y condiciones de existencia contrarios al principio causal que él conoce, jamás enriquecerá su ciencia con la adición de una nueva idea (...) Es la visión imaginativa la que permite emitir una hipótesis, y luego viene la investigación experimental para establecer las pruebas de las hipótesis. (Planck, 1961:120)

Si bien Planck criticó fuertemente el positivismo, en tanto desde esa mirada se privilegiaba una imagen antropomórfica de la naturaleza, tampoco concebía que se realizaran afirmaciones sobre el comportamiento de la naturaleza a través de consideraciones que sólo estaban en la imaginación del científico, como las hipótesis especiales sobre la constitución de la materia y el comportamiento microscópico, dado que no había manera de justificarlas. Sin embargo, al encontrar la validación *a posteriori* de las hipótesis del caos molecular y de la radiación natural –con la formación de la ley de radiación de cuerpo negro–, el carácter imaginativo del investigador entra a ser considerado, por Planck, como un elemento esencial dentro de la actividad científica.

Justamente la actividad de tensión absoluto–probabilidad estuvo determinada por lo que Planck denomina como “imaginar sucesos y condiciones de existencia

contrarios al principio causal”, pues fue desde la consideración del comportamiento mecánico de los gases, enunciado por Boltzmann, que Planck se ve en la tarea de contestar sus preguntas, sobre la irreversibilidad de los procesos físicos, conjugando la hipótesis atómica y del caos molecular con el comportamiento macroscópico de los gases, obteniendo la definición de la magnitud de la entropía y con ello la respuesta a la interacción entre radiación y materia. Claro está que la actividad del investigador no es deliberada, se tienen en cuenta los principios racionales que guían el trabajo del científico; es por esta razón que Planck retoma el trabajo de Boltzmann, dado que le brindaba a la definición de la ley del aumento de entropía el carácter no antropomórfico del que carecía hasta el momento. De manera que los sucesos y condiciones que Planck permitió en su explicación –y que se pueden resumir en el término: probabilidad– contradecían, en parte, la imagen de naturaleza que tenía –universal y absoluta–, pero no así las exigencias a las que sometía los absolutos desde los cuales construía la imagen, justificando esto con la última frase de la cita: es necesario someter a prueba experimental.

Reichenbach (1955:195) considera que con la admisión de la probabilidad en la descripción física se reconoce el residuo irracional de cada acontecer en la naturaleza, que desde el determinismo se reducía a tal punto que se omitía. Afirma que:

El principio de probabilidad significa (...) una suposición acerca del residuo irracional de todo acontecer, mientras que el principio de causalidad representa un supuesto sobre los factores racionales; ambos principios, a la vez, determinan el acontecer natural.

Esto resulta importante en tanto, como afirma Heisenberg (1979:21), “los conceptos tradicionales conforman la manera en que pensamos sobre los problemas y determinan nuestras preguntas”, por lo que, un cambio en los conceptos repercute en los aspectos teóricos y prácticos que privilegia el investigador. Es en este sentido que se reconoce un vínculo entre el factor irracional que implicó la admisión de la probabilidad en la explicación de los fenómenos físicos y el factor irracional en el investigador. Este último es la imaginación, que Planck reconoce junto con la racionalidad de las teorías y los datos experimentales como determinantes en el quehacer del científico.

En 1936 Planck retoma, en su trabajo *“La filosofía de la física”*, el papel de la imaginación en el trabajo científico, allí afirma: “el progreso está vinculado con el elemento irracional [: la imaginación] (...) porque la irracionalidad es un componente necesario en la composición de cada intelecto” (Planck, 1963:105). Esta afirmación se corresponde con la introducción de la probabilidad en la definición de absolutos, si bien uno de los resultados de la tensión absoluto–probabilidad fue ampliar los principios racionales enfrentados –lo absoluto y la probabilidad–, también se dejó la puerta abierta a lo que es fortuito en un fenómeno físico, y que unos años más adelante del trabajo de Planck se denominó como principio de incertidumbre.⁶⁷ De igual manera, en el quehacer del científico se da cabida a aspectos que no están dentro de los márgenes hasta ese momento permitidos: la imaginación y la síntesis de ideas contrarias, lo denominado por Planck como elemento irracional.

La actividad del científico, entonces, a partir de la tensión entre los principios que guían su investigación, se ve marcada por: sus principios racionales, la tradición científica y un elemento creativo que le permite tomar elementos no considerados desde sus principios y, tal vez, tampoco desde la tradición.

Por otra parte, la introducción de la probabilidad en la definición de las magnitudes que dan cuenta de la imagen de la naturaleza trajo consigo un cambio en las preguntas que debió realizar Planck para describir los fenómenos naturales. Desde la mirada macroscópica los fenómenos se analizaban de manera que cada parte de la realidad involucrada se sometía a preguntas como las siguientes: ¿cuál es la cualidad de la naturaleza que cambia o que permanece constante durante un proceso? ¿Cuál es la diferencia entre los valores de la entropía al iniciar y al finalizar un proceso? ¿Cuál es el estado de la naturaleza posteriormente de darse inicio el proceso? ¿Cuál es el promedio de las lecturas de los aparatos de medida? De la misma manera, la mirada microscópica exige un modo de describir los fenómenos, que exige la consideración de una imagen de la naturaleza –involucrada en el fenómeno– configurada por un gran

⁶⁷ El principio de incertidumbre, planteado por Werner Heisenberg en 1927, puede ser explicado bajo el requerimiento de la descripción probabilística de los fenómenos. La interpretación estándar de este principio implica la imposibilidad de decir algo respecto a la realidad subyacente de los fenómenos cuánticos. Esto plantea problemas en el ámbito de la filosofía de las ciencias respecto las consideraciones sobre la realidad y la estructura predictiva sobre la que se sostiene la física clásica, particularmente; lo que repercutió en las consideraciones sobre el carácter determinista de los fenómenos físicos y el principio de causalidad en el que se basaban las explicaciones de la naturaleza. (Martínez, 2003)

número de elementos, y por tanto el cálculo de probabilidad como la manera más indicada de describir los procesos; por lo cual, algunas de las preguntas que se deben responder son: ¿cuál es la tendencia de movimiento de los elementos del sistema (objeto de estudio involucrado en el fenómeno)? ¿Cuál es la distribución de velocidades de los elementos? ¿Cuál es la frecuencia en la distribución al transcurrir el proceso? ¿Cuál es la probabilidad de cada distribución?

Este conjunto de preguntas correspondientes a cada mirada desde la que, previo a la tensión absoluto–probabilidad, Planck podía hacerse una imagen de la realidad, debieron reformularse de manera que describieran a la naturaleza que tiene comportamientos macroscópicos debidos a procesos microscópicos, ambos determinados por absolutos, como el principio de aumento de entropía. ¿Cómo reformuló Planck su manera de interrogar los procesos naturales? Es una pregunta que resulta de la tensión y que se debe vincular a un aspecto que se acaba de discutir: la causalidad de los eventos naturales.

Una de las emergencias de la tensión absoluto–probabilidad es la definición de la probabilidad termodinámica, como un concepto desde el cual se debe hacer la descripción de los procesos físicos que involucren el carácter microscópico de la naturaleza, por ejemplo: el comportamiento de los gases o la interacción entre radiación y materia. Desde este concepto la causalidad de los fenómenos físicos, que se caracterizaba por el seguimiento en el tiempo de los estados macroscópicos de la naturaleza, debió ampliarse con el concepto de frecuencia –frecuencia de una distribución de velocidades o distribución de frecuencias de radiación– que implica la probabilidad de los estados microscópicos de los sistemas. Así la pregunta que, desde el mecanicismo, Planck no debía formularse: ¿cómo acontecen los cambios de la naturaleza en el tiempo?, se vuelve obligatoria; porque es en la tensión de sus principios racionales que Planck necesita dar sentido y validez a elementos conceptuales que constituyen la tensión: lo absoluto y la probabilidad.

Otro aspecto que influye en el quehacer del investigador es la estrategia epistemológica que resulta de la tensión, en palabras del propio Planck: “la reconciliación de opuestos mediante la fertilización y amalgama mutua” (Planck en Sánchez, 2005:146); ejemplo de esto es la relación entre: el principio de aumento de

entropía, y la entropía definida desde la probabilidad termodinámica; la descripción macroscópica de los fenómenos naturales y la descripción microscópica de los mismos. ¿Qué resultados trajo consigo esta actividad a la cosmovisión de Planck?

Las diadas absoluto–probabilidad y macro–micro (mirada macroscópica, estado macroscópico, mirada microscópica, estado microscópico) emergentes de la tensión, son resultado de la amalgama entre opuestos; y como consecuencia, de esta actividad de conocimiento de Planck, son aspectos característicos de la lógica desde la que abordó el problema del cuerpo negro. Así la emergencia de la tensión no incidió en el primer nivel de la cosmovisión de Planck; las diadas de opuestos permitieron tener una imagen que caracterizaba, de manera más cercana, la unidad de la naturaleza.⁶⁸ La incidencia principal fue en el quehacer científico, pues implicaba el ejercicio permanente de reconocimiento de las ideas desde las cuales se podía explicar la naturaleza, así se alejaron del “principio causal” desde el que Planck, particularmente, formulaba sus hipótesis.⁶⁹

Hasta el momento, la emergencia de la tensión entre principios racionales en Planck, presenta la necesidad de esta actividad intelectual para que se reconozcan los elementos teóricos desde los que se explica el mundo que se estudia (la naturaleza), resulta ser una actividad en la que el investigador se ubica en un estado de no comodidad explicativa que le obliga a exponer los principios que orientan su quehacer y a enfrentarlos con otros que resulten responder a las inquietudes que pretende resolver. La tensión implica para el investigador, como escribió Planck al describir el proceso de definición de la entropía, concebir una imagen de su quehacer sin color,

⁶⁸ Esta cita corresponde a un párrafo que rescata Sánchez (2005:146) de una conferencia de Planck en 1918 frente a la Sociedad Alemana de Física: “siempre me ha parecido (...) que lo más importante, el propósito que ha guiado todos mis trabajos científicos, es la mayor simplificación y unificación posible de la imagen física del mundo y que el primer medio para alcanzar este fin es la reconciliación de opuestos mediante la fertilización y amalgama mutua”

⁶⁹ Es importante retomar la cita que páginas atrás se realizó en la que Planck expone que la elección que tome un físico entre el principio de causalidad dinámico y el principio de causalidad estadístico, no está determinada por la imposición de la teoría (de la tradición científica) sino que depende “hasta qué grado se avanza por uno y otro camino” dentro de la actividad explicativa, pues es en la práctica del científico que se elige el principio causal “que prometa ser más satisfactorio en sus resultados lógicos” (Planck, 1961:104). Planck le atribuye un papel importante al investigador, en la tarea de hacer *la* imagen de la naturaleza, es quien determina los elementos explicativos: conceptos, lenguaje, algoritmos, etc. y su organización dentro de una lógica que permite hablar del comportamiento de la naturaleza.

nada puede verse definido más que los absolutos.⁷⁰ El investigador que esté en la actividad de comprender lo que ocurre a su alrededor debe realizar esfuerzos que lo llevan a lugares incómodos en el conocimiento; también lo expresó Planck en una conferencia sobre el desarrollo de la mecánica cuántica:

(...) el hombre se equivoca, siempre y cuando se esté esforzando, y todo el esfuerzo mental de un investigador asiduo podría parecer inútil y sin esperanza, si de vez en cuando no corre a través de hechos notables que forman la prueba irrefutable de la verdad que busca, y le muestra que después que todo se ha acercado un poco a su objetivo. (Planck, 1922:3)

Las consideraciones ontológicas sobre el objeto de estudio en la tensión absoluto–probabilidad, el carácter hipotético de las teorías y las consideraciones sobre el investigador emergentes de la tensión, resultan ser tres aspectos de la actividad de investigación que se distinguen en tanto forman parte de la misma actividad, en tanto se reflejan los resultados emergentes de la tensión entre principios racionales; por esta razón los tres aspectos se cruzan, no se puede hacer una reflexión sobre los cambios a nivel ontológico del objeto de estudio sin mencionar los cambios a nivel epistemológico en la investigación. Hacer una mirada sobre cada uno de estos aspectos permite hacer una caracterización de los resultados de la tensión en Planck que influyeron notablemente en el segundo nivel de su cosmovisión.

⁷⁰ “Si revisamos superficialmente los cambios a los que ha sido objeto nuestra concepción del universo por la ciencia desarrollada, y teniendo en mente las características de este desarrollo (...) tenemos que admitir que la imagen del futuro parece sin color cuando es comparada con el glorioso color de la imagen original, teñida con las múltiples necesidades de la vida humana, y para lo cual contribuyeron todos los sentidos con su parte. Esta comparación resta enormemente el valor de una ciencia exacta, y entonces llega a ser mayor la dificultad de ignorar la evidencia de los sentidos (...) y consecuentemente no podemos tener un conocimiento directo de lo absoluto” (Planck, 1960:20).

CONCLUSIONES

En este punto de la investigación, cuyos resultados se han expuesto en los capítulos anteriores, se cuenta con las siguientes consideraciones derivadas de la tensión absoluto–probabilidad en Planck, para dar respuesta a la pregunta que orientó la tesis, ¿Cómo de la tensión entre principios racionales emerge una nueva forma de ver y explicar el mundo? La primera consideración enuncia que la tensión entre principios racionales es una actividad racional del investigador. La segunda se refiere a que el quehacer científico implica concebir cambios ontológicos, lógicos y de método en el proceso de explicación. Y la última consideración es que la ciencia, como actividad, es histórica.

Respecto a la primera consideración se parte de que los principios racionales implican criterios y compromisos con una tradición científica definida, se ven reflejados en la práctica del investigador y se plasman en los productos de la actividad científica (teorías, leyes, protocolos, publicaciones, etcétera). Poner en tensión principios racionales implica, en primera instancia, enfrentar cuerpos teóricos consolidados, para lo cual es necesario hacer una revisión de lo que Planck denomina como “dogmas teóricos” desde los cuales el investigador formula sus preguntas, realiza sus observaciones en el laboratorio y establece relaciones; en otras palabras, la tensión implica *conocer* los productos de cada principio enfrentado. En segunda instancia, la tensión implica reconocer elementos comunes y relevantes para los cuerpos teóricos enfrentados, identificar la manera de proceder frente a un objeto de estudio común y establecer criterios que permitan construir un vínculo entre principios racionales. Y por último, dar sentido al vínculo establecido en la explicación del objeto de estudio, con lo cual, el estado de tensión entre los principios racionales desaparece y emerge una nueva lógica que los envuelve. Es en este sentido que *la tensión entre principios racionales es una actividad racional*.

La entropía es el primer aspecto común en la tensión en Planck, es el campo conceptual en el que se enfrentan los absolutos y la probabilidad, como objeto de estudio fue el que determinó el estado de la tensión y un indicador de las emergencias.

En este campo se identificaron como elementos teóricos característicos del proceso de la tensión absoluto–probabilidad los siguientes: la *validez universal* como elemento común de la ley del aumento de entropía y de la probabilidad matemática; la *relación entre entropía y probabilidad* en esta ley, con la admisión del caos molecular como el estado microscópico de los sistemas que se corresponde al estado de equilibrio macroscópico; y la definición de la probabilidad termodinámica como la manera de atribuir a la probabilidad un *sentido físico* en la definición de un principio absoluto. Son estos mismos elementos los que le permitieron a Planck conjugar dos miradas diferentes sobre el comportamiento de la naturaleza, la mirada macroscópica y la mirada microscópica, en la definición de la ley del aumento de entropía como un principio absoluto.

Como actividad racional, la tensión implica un proceso de conocimiento en el que el investigador conjuga elementos teóricos, confronta la imagen que tiene del mundo y pone en juego la “imaginación constructiva” –haciendo uso de una de las características que Planck le exige al científico– para la elaboración de hipótesis, todo desde la revisión crítica que llevó al científico a ponerse en tensión. Es de aclarar que tanto conjugar y confrontar, así como imaginar, son acciones del conocimiento científico que se incluyen en la objetividad que caracteriza los productos de la ciencia. Así, la tensión entre principios racionales pone de relieve el papel que tiene el investigador en la investigación científica, pues es quien da el carácter de racionalidad al conocimiento científico.

Entonces, el proceso de tensión absoluto–probabilidad en el quehacer de Planck dio sentido a la explicación de los procesos macroscópicos desde el análisis del comportamiento microscópico de la naturaleza, en tanto Planck comprobó, dentro de la lógica macroscópica y dentro de la tradición mecanicista, las hipótesis del caos molecular y de la radiación natural. De manera que la cosmovisión emergente de la tensión –donde las diadas macro–micro y absoluto–probabilidad hacen parte de la lógica desde la que Planck abordó el problema del cuerpo negro y con las que pudo acercarse al carácter de unidad de la naturaleza– se convierte en el marco racional, en una nueva lógica, desde el que Planck se explica el mundo.

Por lo tanto, la relación epistemológica entre sujeto–objeto (Planck–entropía) en la tensión absoluto–probabilidad implica reconocer el carácter hipotético de las teorías, es decir el carácter hipotético de los productos de la actividad científica. Esto obliga a que el investigador que haga una mirada sobre la ciencia, o el investigador que esté dentro de la actividad científica, considere: la dinámica de los objetos de investigación, la dinámica de la lógica desde la que se estudian dichos objetos, la dinámica del método que emplea el investigador y la dinámica en el vínculo que establece el investigador entre la realidad que se quiere explicar y la imagen que de ésta ha construido; es decir, es una exigencia sobre la ciencia y en la ciencia del reconocimiento de la dinámica del conocimiento científico. Esto implica prestar atención al método, a los elementos de orden epistemológico, lógico e histórico en la actividad científica; en otras palabras, se hace necesario que el investigador se ubique en la metodología de la ciencia.

De modo que la tensión actualiza el conocimiento que el investigador tiene sobre su entorno desde la ciencia, redefiniendo tanto el objeto de conocimiento como lo que se conoce de éste. Así la emergencia de la tensión tiene influencia directa en el ámbito epistemológico, ontológico y metodológico. Entonces dentro del *quehacer científico es necesario concebir cambios ontológicos, lógicos y de método en el proceso de explicación*. Esta es la segunda consideración para dar respuesta a la pregunta que guió esta investigación.

Volviendo sobre la tensión absoluto–probabilidad. La explicación de la naturaleza desde la lógica que envuelve lo macro y lo micro hace necesario que los términos en los que se establecen las relaciones entre magnitudes, las estrategias para elaborar hipótesis, las preguntas que formula el investigador al fenómeno, etcétera, cambien. Razón por la cual, Planck, definió la probabilidad termodinámica como un concepto que involucra la descripción microscópica de los fenómenos, por ejemplo el comportamiento de los gases o la interacción entre radiación y materia; también amplió la noción de causalidad con el concepto de frecuencia, que implica la probabilidad de los estados microscópicos de la naturaleza; y cuestionó cómo acontecen los cambios de la naturaleza en el tiempo –debido a que su interés con la definición de la entropía era clasificar los fenómenos, no por su naturaleza sino, por su comportamiento en el tiempo, en: reversibles e irreversibles–.

Entonces una de las razones por las que la tensión entre principios racionales conllevan a un cambio en la manera como el investigador mira el mundo, es precisamente la redefinición que hace de sus objetos de estudio y la manera como los aborda. Implica un ejercicio permanente de reconocimiento de las ideas desde las cuales se puede explicar los procesos en la naturaleza, a pesar de que se alejen de los principios que guían la investigación. Con esto último, y de acuerdo con Planck, una manera de avanzar en el quehacer científico es la “reconciliación” y “amalgama” de ideas, conceptos, procesos contrarios frente a un mismo objeto de estudio.

La última consideración que se destaca en la discusión sobre la tensión entre principios racionales en la emergencia de nueva cosmovisión del investigador, es *el carácter histórico de la ciencia*; aspecto que marca cada una de las afirmaciones que se han realizado a lo largo de la tesis. Para hablar de ello se parte del trasfondo que guarda la segunda consideración, debido a que al reconocerse que en la ciencia pueden darse cambios a nivel ontológico, a nivel lógico y de método, se están planteando implícitamente, por lo menos, dos aseveraciones: la ciencia es una actividad y el cambio es debido al quehacer de los investigadores.

Respecto a la primera aseveración, la ciencia es más que la suma de teorías, leyes y métodos que se aplican en un laboratorio; la ciencia es una actividad de conocimiento que realizan ciertos sujetos –los científicos o los investigadores– bajo circunstancias de orden social, económico, ideológico, académico, etcétera, que repercuten en el quehacer y en sus resultados. En este sentido la ciencia guarda un carácter histórico; dado que hace parte de la dinámica socio-cultural en un espacio y tiempo específico, y depende tanto de la evolución que ha tenido esa dinámica como de los resultados en los que desencadenará. Con la tensión absoluto-probabilidad en Planck, se encontró que la situación de los laboratorios y universidades alemanas incidieron en las búsquedas de Planck; los recursos experimentales, los datos, los contactos, su posición frente al estado, fueron factores que contribuyeron a las respuestas dadas por Planck frente a su actividad científica. De aquí que en un mismo punto geográfico y temporal coincidieran teorías físicas elaboradas al inicio del siglo XIX (por ejemplo, la termodinámica de Rudolf Clausius), así como los esfuerzos técnicos en los laboratorios del PTR a finales del decimonónico y se vislumbraran las

nuevas hipótesis y campos de estudio de los científicos (especialmente la física de los *cuantos*).

La segunda aseveración. Son los sujetos quienes al realizar y enunciar el proceso de la ciencia, dan la posibilidad del cambio; por ejemplo, la redefinición de la entropía y la admisión de la probabilidad en la definición de las magnitudes. Dentro de la actividad científica el investigador –en tensión entre principios racionales– incluye sus inquietudes y sus principios racionales, hace uso de la tradición científica y de su imaginación, realiza sacrificios teóricos en las hipótesis que enuncia, establece relaciones, elabora explicaciones, etcétera. Desde aquí el investigador hace una mirada al pasado y al futuro para responder a sus tareas presentes; es decir, integra en un proceso los resultados de la ciencia y la evolución del pensamiento científico, generando cambios en su cosmovisión del mundo y en la manera como realiza su quehacer.

En este momento de conclusión de la tesis, surgen algunas preguntas que no fueron abordadas, pero que son resultado de la discusión aquí presentada, y cuya resolución permitiría dar otras características a la categoría de tensión entre principios racionales:

En la emergencia de la tensión absoluto–probabilidad no se tuvo en cuenta el trabajo de Planck en su intento de explicar la hipótesis del *cuanto de acción*. Hay una diferencia entre el proceso de explicación, que realizó Planck durante la tensión, de la entropía y de la hipótesis del caos molecular, y el proceso de explicación de la hipótesis de la naturaleza discontinua de la radiación; pues ésta generó interrogantes al paradigma clásico y Planck decidió después de muchos intentos dejarle la tarea a sus sucesores. Entonces ¿Hasta qué punto la tensión entre principios racionales permite sobrepasar las hipótesis que no tienen una carga de tradición teórica? Y, en este sentido, ¿Qué límites tiene la tensión entre principios racionales?

Otra de las inquietudes se ubica dentro del campo de la filosofía de la ciencia. Dado que la tensión entre principios racionales, particularmente la tensión absoluto–probabilidad, se consideró como una actividad de incidencia a nivel ontológico, lógico y

de método, ¿Cómo incide la tensión en el valor de verdad que le atribuye el investigador a los productos científicos?

Y, finalmente, en la definición de la tensión y de sus emergencias no se contemplaron categorías de la dialéctica, sin embargo se pueden encontrar elementos que entrarían en discusión desde este método, entonces ¿Qué características pueden atribuirse a la tensión entre principios racionales desde el método dialéctico? Con estas preguntas, se muestra la tensión entre principios racionales como un campo de investigación en el que se pueden ubicar otras perspectivas y discursos sobre la ciencia.

Hasta este punto, aunque no se cuenta con la respuesta de las anteriores preguntas, se puede concluir que de *la tensión entre principios racionales emerge una nueva forma en la que el investigador ve y explica el mundo*. En tanto que una nueva forma de ver y explicar el mundo implica, en el campo epistemológico de la actividad científica, cambios en la relación sujeto–objeto; los cuales, en la actividad de conocimiento, inciden en el plano ontológico, en el vínculo que el investigador establece entre la realidad y la imagen que construye de ésta desde la actividad científica. Aspectos que se relacionan con las emergencias de la tensión entre principios racionales y que residen en el carácter histórico de la ciencia.

La investigación expuesta ha dejado una reflexión que exige que el investigador no sólo participe en el plano convergente de la ciencia, sino que también debe ser crítico de su actividad en la ciencia. Las palabras de Planck resumen así la reflexión: “El hombre que no puede imaginar sucesos y condiciones de existencia contrarios al principio causal que él conoce, jamás enriquecerá su ciencia con la adición de una nueva idea” (1961:120), “[este] esfuerzo mental de un investigador asiduo podría parecer inútil y sin esperanza, si de vez en cuando no corre a través de hechos notables que forman la prueba irrefutable de la verdad que busca” (1922:3). Esta es la esencia de la tensión entre principios racionales en el quehacer científico.

BIBLIOGRAFÍA

Academia de Ciencias de la URSS, Instituto de Filosofía; Academia de Ciencias de Cuba, Departamento de Filosofía. (1985) *Metodología del conocimiento científico*, 5a ed. Quinto Sol, México.

Bachelard, Gastón. (2005) *El compromiso racionalista*, 9ª ed. Siglo XXI, México.

Bohm, David. (1959) *Causalidad y azar en la física moderna*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México.

Born, Max. (1956) *Physics in my generation. A selection of papers*. Pergamon Press, Inglaterra.

Cardwell D.S.L. (1971) *From Watt to Clausius. The rise of thermodynamics in the early industrial age*. Cornell university press, Inglaterra.

De Broglie, Luis. (1965) *La física nueva y los cuantos*, 5a ed. Losada, Argentina.

Del Río C., José L. (2001) "Los trabajos originales de Planck". *Boletín de la Sociedad Mexicana de Física*, vol. 15, núm. 3, pp 101-110.

_____. (2007) "El principio de Boltzmann una ventana al microcosmos", en García-Colín, Leopoldo, P. Goldstein y J.L. Del Río C. (Coor.). (2007) *Ludwig Boltzmann a cien años de su muerte*. El Colegio Nacional, México.

_____. (2010) "Planck y la radiación", en García-Colín, Leopoldo, J.L. Del Río C. y H. Uriarte R. (Coor.). (2010) *Max Planck a ciento cincuenta años de su nacimiento*. El Colegio Nacional, México.

Dynnik, M.A. (comp.). (1963) *Historia de la filosofía. Desde finales del siglo XIX hasta la revolución socialista de octubre de 1917*, Tomo V. Traducción del ruso por José Lain, Grijalbo, México.

Heisenberg, Werner. (1979) *Encuentros y conversaciones con Einstein y otros ensayos*. Alianza, España.

Heilbron, J. L. (1986) *The dilemmas of an upright man. Max Planck as spokesman for German science*. University of California Press, Estados Unidos.

Holton, Gerald. (1982) *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein*. Alianza, España.

_____. (1985) *La imaginación científica*. Fondo de Cultura Económica (FCE), México.

Kuhn, Thomas. (1980) *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica 1894-1912*. Traducido del inglés por Miguel Paredes Larrucea, Alianza, España.

_____. (1982) *La tensión esencial. Estudios selectos sobre la tradición y el cambio en el ámbito de la ciencia*. FCE, México.

_____. (2006) *La estructura de las revoluciones científicas*, 3a ed. FCE, México.

Kragh, Helge. (2000) "Max Planck: the reluctant revolutionary", *Revista electrónica PhysicsWorld*, Dic. 1. Disponible en <<http://physicsworld.com/cws/article/print/373>> (10 de octubre de 2010).

Labastida, Jaime. (2007) *El edificio de la razón. El sujeto científico*. Siglo XXI, México.

Lozano M., Juan M. (2001) "Max Planck, su generación y su trágico destino", *Boletín de la Sociedad Mexicana de Física*, vol. 15, núm. 3, pp 93-99.

Maksabedián A., Jorge. (1982) *El método en la física*. Instituto Politécnico Nacional, México.

Martínez, Sergio. (2003) "Cien años de mecánica cuántica en filosofía", en Ramos L. María de la Paz (Coor.). (2003) *La mecánica cuántica en México. Una visión interdisciplinaria a cien años de su nacimiento*. Siglo XXI, México.

Montes De Oca, Francisco. (1997) *Historia de la filosofía*. Porrúa, México.

Nicol, Eduardo. (1965) *Los principios de la ciencia*. FCE, México.

Olalla L., Carlos. (2006) *La fuerza del deber Planck*. Nivola, España.

Pérez C., J. (2007) *La termodinámica de Carnot a Clausius*, Conferencia impartida en el curso "La ciencia europea antes de la Gran Guerra" organizado por la Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia, Tenerife.

Planck, Max. (1914) *The theory of heat radiation*, 2a ed. Traducido del alemán por Morton Masius, Blakiston's son & co, Philadelphia.

_____. (1915) *Eighth lectures on theoretical physics*. Traducido del alemán por A.P. Wills, Columbia University Press, New York.

_____. (1922) *The origin and development of the quantum theory*. Traducido del alemán por H.T. Clarke y L. Silberstein, Oxford, New York.

_____. (1945) *Treatise on thermodynamics*, 3a ed. Traducido del alemán por Alexander Ogg, Dover, New York.

_____. (1958) "Autobiografía científica", en Haro, Guillermo, S. Ramos y E. de Gortari (eds.) *Suplementos del seminario de problemas científicos y filosóficos*. Segunda serie, UNAM, México.

_____. (1960) *A survey of physical theory*. Traducido del alemán por R. Jones y D.H. Williams, Dover, New York.

_____. (1961) *¿A dónde va la ciencia?*, 4a ed. Traducido del inglés por Jiménez de Asúa, Losada, Argentina.

_____. (1963) *The philosophy of physics*. Traducción del alemán por W.H. Johnston, The Norton Library, New York.

_____. (2000a) “Problemas aparentes de la ciencia (1947)”, en Moreno G., Antonio, *Autobiografía científica y últimos escritos*. Traducido del alemán por José Manuel Lozano, Nivola, España.

_____. (2000b) “Sentido y límites de la ciencia exacta (1941)”, en Moreno G., Antonio, *Autobiografía científica y últimos escritos*. Traducido del alemán por José Manuel Lozano, Nivola, España.

Sánchez R., José M. (2005) *Historia de la física cuántica. Vol 1. El periodo fundacional (1860 – 1926)*, 2a ed. Crítica, España.

_____. (2007) *El poder de la ciencia. Historia social, política y económica de la ciencia (Siglos XIX y XX)*. Crítica, España.

Reichenbach, Hans. (1955) *Objetivos y métodos del conocimiento físico*. Traducido del alemán por Eugenio Imaz, FCE, México.

Stern, Fritz. (2003) *El mundo alemán de Einstein. La promesa de una cultura*. Traducido del inglés por Gemma Andújar, Paidós, España.