



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

ANÁLISIS DE LA ELECTRODINÁMICA
ESTOCÁSTICA COMO UNA
CONSTRUCCIÓN TEÓRICA PARTICULAR

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
FÍSICA

PRESENTA:
FERNANDA CASTRO CASAS

DIRECTORA DE TESIS:
DRA. ANA MARÍA CETTO KRAMIS



2014

Ciudad Universitaria, D. F.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ
Jefe de la División de Estudios Profesionales
Facultad de Ciencias
P r e s e n t e

Por este medio, el Comité Académico de la Licenciatura en Física informa a usted que el día 27 de agosto de 2014, aprobó que la alumna

Castro Casas Fernanda

con número de cuenta 30118994-1, presente el trabajo titulado

Análisis de la electrodinámica estocástica como una construcción teórica particular

como trabajo escrito correspondiente a la Opción de Titulación por "Tesis".

Asimismo, este Comité informa a usted que el tutor y los sinodales autorizados para la dirección y revisión del trabajo arriba señalado son:

Presidente	M. en C. José Luis Jiménez Ramírez
Vocal	Dr. Miguel Alcubierre Moya
Secretario (Tutor)	Dra. Ana María Beatriz Cetto Kramis
Suplente	Dr. José Ernesto Marquina Fábrega
Suplente	M. en C. Ignacio Campos Flores

En consecuencia, este Comité solicita a usted se entregue a la citada alumna la papelería que conforme a la normatividad aplicable debe llenar, se proceda a la elaboración de los votos aprobatorios y se dé inicio al proceso de revisión de estudios correspondiente.

Atentamente,
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Ciudad Universitaria, D. F., a 27 de agosto de 2014.
COORDINADORA DEL COMITÉ ACADÉMICO DE LA LICENCIATURA EN FÍSICA

Mirna Villavicencio Torres
M. EN C. MIRNA VILLAVICENCIO TORRES



FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO
DE FÍSICA

Dedicado a la memoria de mi abuela Rosa Sánchez Vega.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi gratitud a la Dra. Ana María Cetto por haberme asesorado durante la realización de la tesis, y por darme la confianza de presentar mis ideas. Aprovecho este medio para decirle que admiro su labor en la ciencia y su compromiso con la universidad.

Hago un reconocimiento al Dr. Luis de la Peña por su valiosa guía, en particular de los capítulos tres y cuatro de la tesis.

Al Dr. José Marquina le agradezco su orientación en la investigación inicial que hice para la tesis, y que dio origen al capítulo uno.

Quiero agradecer a mis padres: Lulú y Fernando; a mi mamá por ofrecerme un hogar agradable, y a mi papá por dar su mayor esfuerzo por mi bienestar. A ambos por estar siempre conmigo, por su comprensión y por respetar mis decisiones. Mi vida tiene una dirección gracias a ustedes.

A Marco Antonio Álvarez le agradezco nuestras conversaciones sobre los fundamentos de la Física; su influencia me ha permitido analizar con mayor profundidad qué es la Física, lo cual motivó el desarrollo del capítulo dos de la tesis. Gracias por todos estos años de amistad... por fin terminamos. Hago una mención especial a sus padres, la Sra. Yolanda y el Sr. Angel, por brindarme un espacio en su familia.

Le doy las gracias a mi hermano, Gabi, por su compañía. Aprecio los lazos afectivos que nos unen.

Es un honor haber recibido mi formación profesional en mi *alma máter*: la Universidad Nacional Autónoma de México, en la Facultad de Ciencias.

Agradezco al Instituto de Física por incorporarme como estudiante asociada. También agradezco el apoyo de la DGAPA-UNAM a través del proyecto PAPIIT IN112714.

Índice general

INTRODUCCIÓN Y RESUMEN.	III
1. UNIDADES DE ANÁLISIS.	1
1.1. Antecedentes de las unidades de análisis.	1
1.1.1. Visión positivista.	2
1.2. Las unidades de análisis.	5
1.2.1. El modelo de Kuhn; UA: el paradigma.	7
1.2.2. El modelo de Lakatos; UA: el programa de investigación.	10
1.2.3. El modelo de Laudan; UA: la tradición de investigación.	14
1.2.4. Comparativo.	16
2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES.	19
2.1. Las teorías físicas.	19
2.1.1. El realismo científico y otras posturas filosóficas.	21
2.1.2. El positivismo y las UA vs realismo científico.	25
2.2. Los conceptos fundamentales en las teorías físicas.	29
2.2.1. Las categorías.	30
2.2.2. El positivismo y las UA vs estructura causal.	34
2.2.3. Criterio de realidad de EPR.	35
3. ESCENARIO DE LA MECÁNICA CUÁNTICA.	38
3.1. Estructura matemática e interpretación de la mecánica cuántica.	38
3.1.1. La ecuación de Schrödinger.	40
3.1.2. La ecuación de Heisenberg.	43
3.1.3. Desigualdades de Heisenberg.	50
3.2. Un escenario de la mecánica cuántica.	54
3.2.1. La mecánica cuántica y otras teorías.	55
3.2.2. Evaluando a la mecánica cuántica.	57

4. ELECTRODINÁMICA ESTOCÁSTICA.	60
4.1. De la mecánica cuántica a la electrodinámica estocástica.	60
4.1.1. Teorías alternativas a la mecánica cuántica.	62
4.1.2. La electrodinámica estocástica como UA.	64
4.2. Fundamentación realista y causal de la mecánica cuántica. . .	68
4.2.1. Sobre la deducción de la ecuación de Schrödinger.	69
4.2.2. Sobre la deducción de la ecuación de Heisenberg.	73
4.2.3. Sobre el origen físico de las desigualdades de Heisenberg.	77
4.2.4. Resumen y conclusiones.	79
A. Cuerpo negro.	82
A.1. Distribución de Rayleigh-Jeans.	83
A.2. Distribución de Planck.	84
B. Cuerpo negro y campo de punto cero.	86
B.1. Energía de Planck.	87

INTRODUCCIÓN Y RESUMEN.

La filosofía de la ciencia tiene como objeto de estudio explicar de qué trata la ciencia, cómo se hace y evoluciona, por lo que se desarrolla tanto en el terreno ontológico como en el epistemológico; la ontología es la teoría sobre la esencia de las cosas puesto que estudia qué es lo real, y la epistemología es la teoría del conocimiento ya que estudia qué es el conocimiento. En particular, el estudio de los fundamentos de la física es el estudio filosófico de los elementos que sustentan las teorías físicas y éste a su vez está contenido en la investigación sobre cómo se construyen las teorías físicas en donde se explora la estructura, organización e interpretación de teorías ya establecidas.

La gama de interés respecto a porque investigar sobre el proceso de construcción de las teorías es amplio, uno de ellos y que constituye *la motivación de esta tesis* es conocer cuáles son las nociones necesarias para desarrollar una nueva teoría, otro y que es *el objetivo de la realización de esta tesis* es entender en qué sentido la física incorpora a la filosofía.

La inmersión en la filosofía de la ciencia para estudiar/investigar cómo se construyen las teorías físicas consta de muchos senderos a seguir, los cuales usualmente se van formando al avanzar en ellos. Debido a la estructura matemática de las teorías físicas en algunos caminos que se pueden seguir se incluye el análisis del proceso de construcción de las matemáticas, no en el camino que aquí se toma porque se considera que en el ámbito de la física se hace énfasis en la aplicación de las matemáticas y no en su parte interpretativa; así que, en vez de investigar cómo se construyen las matemáticas se presentan como uno más de los elementos necesarios en el proceso de construcción de las teorías físicas de tal forma que se disminuye su protagonismo.

Por medio de este trabajo, que consiste en cuatro capítulos, se muestra cómo se forma uno de los posibles senderos que permite llegar *al análisis de la electrodinámica estocástica como una construcción teórica particular*. Sobre la forma de los capítulos cabe decir que todos se dividen en dos secciones

(cada uno con diferente número de subsecciones) en donde se resaltan algunas partes con títulos en negritas que no aparecen en el índice, y en cuanto al fondo a continuación se proporciona un resumen de cada uno.

CAPÍTULO 1:

En la primera sección se expone la filosofía positivista, a la que en los siguientes capítulos se hace referencia en forma recurrente. Se explica el positivismo por medio del trabajo de Comte, el cual da origen a la visión en la que se considera que las teorías científicas únicamente consisten de hechos comprobados, con lo que se establece que los resultados de las teorías siempre son verdaderos y que éstas no estudian las causas de los fenómenos; y con la intención de proporcionar mayor información al lector, se incluyen los cuatro momentos del movimiento positivista: el atomismo lógico de Russell, el análisis del lenguaje de Wittgenstein, la filosofía del círculo de Viena (en donde se explica el calificativo de falsacionismo en las teorías en sustitución del de verificable, concepto que introduce Popper), y el neopositivismo.

En la segunda sección, con base en la premisa de que parece más adecuado comenzar por lo que ya se ha hecho, se explora lo que se ha investigado sobre el proceso de construcción de las teorías científicas. Se expone el paradigma de Kuhn (en donde se analizan los conceptos de inconmensurabilidad entre las teorías, de Kuhn y Feyerabend), el programa de investigación de Lakatos, y la tradición de investigación de Laudan, y se explica que son llamados genericamente *unidades de análisis* que establecen se requieren compromisos ontológicos, supuestos básicos, y compromisos metodológicos en la construcción de las teorías; además, se expone las formas en que las teorías están subordinadas a las unidades de análisis, lo cual se ilustra considerando la mecánica cuántica.

CAPÍTULO 2:

Se inicia la primera sección con el análisis de las teorías físicas restringiéndose a un sector de las teorías científicas, enfatizando que la parte interpretativa de una teoría física implementa una postura filosófica a través de sus compromisos ontológicos. Se presenta el realismo científico, el idealismo y la visión neokantiana, y se deduce que un calificativo más adecuado de las teorías es el falibilismo en vez del de veracidad; además, se analiza si el positivismo y las unidades de análisis son o no objetivos con el fin de que el lector se familiarice con el concepto de objetividad.

En la segunda sección se señala que las interpretaciones que contienen las

teorías físicas han sido objetivas hasta antes de la mecánica cuántica, con lo que se dirige la atención a esta teoría. Se identifican *conceptos fundamentales* denominados categorías que cimientan las construcciones de las teorías físicas, tales como (a)causalidad, espacio, tiempo, (in)determinismo y (no)localidad, y su relación por medio del teorema de Noether; también se señala que las teorías físicas tienen estructura causal o se asocian a otras teorías que las fundamentan, a excepción de la mecánica cuántica, por lo que se puntualiza la relación del positivismo y las unidades de análisis con la causalidad. Se finaliza exponiendo el criterio de realidad y la condición de completitud que se proponen en el artículo *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*, el cual es conocido ampliamente como EPR por las iniciales de sus autores.

CAPÍTULO 3:

En la primera parte se analiza con detenimiento algunos elementos de la mecánica cuántica, los cuales son decisivos en la confrontación de la interpretación ortodoxa de carácter subjetivo y la interpretación estadística de tono objetivo. Se interpreta la ecuación de Schrödinger y la densidad de probabilidad; se expone el espacio de Hilbert, la cuantización canónica, y las descripciones de Schrödinger y de Heisenberg, con la intención de que el material expuesto permita que el capítulo sea autocontenido; se interpreta la ecuación de Heisenberg y los estados entrelazados; se deducen e interpretan las desigualdades de Heisenberg, y se comenta sobre la noción de trayectoria cuántica.

En la segunda parte se retoma el ejemplo que se presenta al final del capítulo uno sobre la relación entre la mecánica cuántica y las unidades de análisis, pero se enriquece con el análisis del capítulo dos y la primera parte de este capítulo; se estudia el teorema de Ehrenfest, y se comenta sobre la relación de la mecánica cuántica con: las partículas relativistas a través de teoría cuántica de campos, y la gravedad con la dualidad de Maldacena; se destaca el problema del cuerpo negro cuyo estudio se extiende en el apéndice A, y se hace una evaluación de la mecánica cuántica considerando la causalidad, el determinismo, la localidad, y el criterio de completitud de EPR. Lo presentado en esta segunda parte conforman un *escenario de la mecánica cuántica* que motiva a la construcción de una nueva teoría que de fundamento a la mecánica cuántica.

CAPÍTULO 4:

Al inicio de la primera parte se menciona que se intentan introducir variables ocultas en mecánica cuántica, y que se han hecho teoremas en contra de dichas variables; se indica que el primer teorema fue el de von Neumann resaltándose las contribuciones de Hermann en contra de éste, y se expone el teorema de Bell. También se explica que el agregar variables ocultas a la mecánica cuántica ha permitido construir teorías alternativas a ésta, y se ejemplifica con la presentación de la teoría de Bohm que le da fundamento causal. Además, se explica que la *electrodinámica estocástica* reproduce la mecánica cuántica pero va más allá al incorporar nueva física a través del campo de punto cero; esta teoría es analizada desde la perspectiva de una construcción teórica, por lo que se presentan sus compromisos ontológicos y metodológicos y sus supuestos básicos, y se especifica su campo de fenómenos de estudio tal que en particular se retoma el estudio del problema del cuerpo negro que se extiende en el apéndice B.

En la segunda parte se presentan algunos de los resultados de la electrodinámica estocástica que son postulados de mecánica cuántica vistos en el capítulo tres, para obtener dichos resultados se considera que el sistema completo consta de una partícula inmersa en el campo de punto cero. Se hace un esbozo sobre la deducción de la ecuación de Schrödinger en donde se usa la suposición de energía de balance, y se presenta la derivación de la regla de Born; también se hace un bosquejo de la deducción de la ecuación de Heisenberg tal que se utiliza la condición de ergodicidad, y se explica que el entrelazamiento de dos o más partículas se puede entender considerando que conforman un sistema completo con el campo de punto cero; además se explica que la causa física de los conmutadores y por ende de las desigualdades de Heisenberg son las fluctuaciones del vacío, nuevamente se comenta sobre las trayectorias cuánticas. Se finaliza con un resumen sobre esta parte incorporando la causalidad, el determinismo y la localidad, y se agregan conclusiones en donde se hace referencia a los capítulos anteriores.

Capítulo 1

UNIDADES DE ANÁLISIS.

El estudio sobre el desarrollo de la ciencia que se ha hecho a través de la historia queda enmarcado en los diferentes modelos de ciencia, los cuales son modelos filosóficos que examinan -en particular- los procesos de construcción de las teorías científicas. Estos modelos incorporan marcos conceptuales denominados *unidades básicas de análisis* (UA), en donde se especifica que en el proceso de construcción de las teorías científicas intervienen primordialmente elementos de nivel ontológico y de nivel metodológico. Antes de explicar y suministrar un panorama de las UA que han desarrollado los filósofos de la ciencia Kuhn, Lakatos y Laudan, quienes se encuentran entre los llamados teóricos de la ciencia postempiristas que han dado origen a una nueva etapa de la filosofía de la ciencia, se dan los antecedentes que permiten presentar la filosofía positivista que es la postura adoptada usualmente en la mecánica cuántica.

1.1. Antecedentes de las unidades de análisis.

Augusto Comte¹ es considerado uno de los grandes representantes de la filosofía de la ciencia.[1] Su trabajo tiene por objetivo el reorganizar a la sociedad, lo cual denota su interés en la política, para lo cual funda la filosofía positiva basándose en la ciencia positiva.² El calificativo de positiva,

¹El filósofo francés Augusto Comte (1798 - 1857) fue discípulo de Claudio Enrique de Rouvroy, conde de Saint-Simon, quien a su vez lo fue de D'alembert y los enciclopedistas. Estos personajes tuvieron una visión de la ciencia *racionalista*, la cual estipula que el conocimiento científico está basado en la razón.[1, p. XXVII]

²[1, pp. 19-21, 24 y 25]

en filosofía y ciencia, indica que el conocimiento verdadero que contienen las teorías científicas es adquirido únicamente por medio de los hechos observados.³ En otras palabras, el conocimiento científico es aquel cuya veracidad en sus proposiciones es probada directamente a través de los resultados experimentales; para los positivistas el mundo consiste en hechos observados. En la literatura, esta postura filosófica es conocida como *justificacionismo*.

Para Comte, la filosofía es la generalización de los resultados de todas las ciencias. En dicha filosofía, a través de un estudio histórico postula el progreso de la humanidad por medio de tres estados: el teológico, el metafísico y el positivo.⁴ Utiliza como método el análisis de los procedimientos que sigue la ciencia positiva por lo que tiene carácter enciclopédico, y establece como finalidad las normas que debe seguir la sociedad. Así que para llegar a su objetivo, Comte, decide copiar las actividades que se han hecho en lo que él llama la ciencia positiva debido a que considera ha sido exitosa. En consecuencia, analiza cómo los científicos positivistas han construido sus teorías y crea la sociología como teoría científica positiva. Claramente se observa en Comte tres facetas: historiador, teórico de la ciencia y sociólogo.

1.1.1. Visión positivista.

En la filosofía positiva se postula que las ciencias constan de conocimientos, que conforman leyes, pero que no buscan las causas. En palabras de Comte:

Por todo lo dicho, vemos que el carácter fundamental de la filosofía positiva consiste en captar todos los fenómenos como sujetos a leyes invariables, cuyo descubrimiento preciso y reducción al menor número posible son la meta de todos nuestros esfuerzos, considerando como absolutamente inaccesible para nosotros y vacía de sentido la búsqueda de lo que se llaman causas, sean primeras, sean finales.[1, p. 40]

Así que para alcanzar sus objetivos, Comte, considera que sólo es necesario obtener de las teorías las leyes y no se interesa por las causas de la naturaleza. Esta jerarquía de niveles de importancia se hereda en la visión positivista, tal que se implementa el que tiene(n) prioridad la(s) teoría(s) sobre la naturaleza. Actualmente, la visión positivista está muy presente en la mecánica cuántica.

³[1, p. 37]

⁴[1, pp. 25-27, 38 y 39]

En su curso de filosofía positiva, Comte, establece el método positivo que consiste en hacer un examen filosófico de las ciencias, y enuncia que observar se compone de tres procedimientos diferentes:

1° Observación. Examen directo del fenómeno tal como se presenta naturalmente.

2° Experimentación. Contemplación del fenómeno más o menos modificado por circunstancias artificiales que intercalamos expresamente buscando una exploración más perfecta.

3° Comparación. Consideración gradual de una serie de casos análogos en el que el fenómeno se vaya simplificando cada vez más.⁵

En conjunto estos tres procedimientos conforman el método comptiano, un tipo de método científico, el cual es parte de la epistemología positivista que indica que el conocimiento científico es adquirido a partir de un hecho observado que es el enfoque de verificación del justificacionismo antes mencionado.

Por lo tanto, siguiendo el método positivo,⁶ para construir una teoría se desarrollan proposiciones que necesariamente son comprobadas experimentalmente. Dichas proposiciones constituyen leyes que se encuentran contenidas en las diferentes ciencias, que en la filosofía positiva se clasifican en dos grupos: uno asociado a los cuerpos inorgánicos y otro a los cuerpos orgánicos. En particular la física es dividida en física inorgánica (celeste y terrestre) y física orgánica (fisiología y sociología); mientras que las matemáticas, dividida en abstracta (aritmética y álgebra) y concreta (geometría general y mecánica racional) no es considerada ciencia, sino base para la misma.⁷

Las proposiciones que constituyen una teoría, a su vez se expresan usando conceptos clasificados por los positivistas como términos teóricos y términos observacionales.[2]⁸ Los primeros, los términos teóricos, son aquellos que no

⁵[1, pp. 46 y 47]

⁶No confundir el método positivo (análisis del proceder de las ciencias, considerando una perspectiva positiva) con el método comptiano (conjunto de procedimientos que siguen las ciencias, resultado de usar el método positivo).

⁷[1, pp. 47-53]

⁸Estrictamente hablando, todos los conceptos de una teoría son términos teóricos. Sin embargo, es usual encontrar en la literatura de la filosofía de la ciencia a los conceptos clasificados como teóricos y observacionales. En el siguiente capítulo se presenta un análisis

tienen relación directa con sistemas o propiedades de éstos que sean observables (ejemplo: el electrón). En tanto que los términos observacionales hacen referencia, como su nombre lo indica, a sistemas o propiedades de éstos que se pueden observar (ejemplo: una mancha roja). Debido a la postura filosófica de los positivistas, conformada por una concepción empirista del conocimiento, los términos teóricos son parte del conocimiento científico porque se pueden escribir en términos observacionales, y su único fin es desarrollar a las teorías de una manera sencilla.⁹

Entre los positivistas hay opiniones encontradas respecto a si cualquier término teórico puede ser escrito en términos observacionales. Destaca el *operacionalismo* (propuesto inicialmente por P. W. Bridgman), en el que se postula que el significado de todo término científico debe estar dado por procedimientos experimentales -operaciones- que conduzcan a la asignación de datos sensoriales (o ser uno de esos procedimientos) con lo cual un solo concepto puede tener muchos significados, tantos como métodos de medición usados para obtener los mismos resultados experimentales; y el *instrumentalismo*, en el que se intenta establecer que los términos teóricos son sólo recursos -instrumentos- para simplificar y generalizar las proposiciones en las teorías.¹⁰

El positivismo lógico.

El movimiento positivista, también denominado positivismo lógico, consta de cuatro momentos:¹¹

(i) El atomismo lógico del filósofo británico Bertrand Russell, en el que se considera el mundo consiste de átomos y sus propiedades que forman hechos atómicos, los cuales a su vez conforman objetos lógicamente complejos. Las entidades inferidas que son entendidas como construcciones lógicas, a decir de Russell, están formados por entidades de sensación cuyo conocimiento depende de los datos obtenidos con la experiencia. Russell fue galardonado con el premio novel de literatura en 1950.[3]

sobre los conceptos comunes a cualquier teoría física.

⁹[2, pp. 11-14]

¹⁰Dudley Shapere analizó la evolución de la relación entre los términos teóricos y observacionales desarrollada por los empiristas, en el artículo *El problema de los términos teóricos* que se encuentra en el compendio [2, pp. 47-69].

¹¹[1, pp. XLV y XLVI]

(ii) El análisis del lenguaje del filósofo austriaco Ludwig Wittgenstein, en el que se considera a la lógica como cimiento del lenguaje y por lo tanto del pensamiento, por medio del cual se describen los hechos del mundo que consisten en la existencia de los hechos atómicos. Wittgenstein, quien fue discípulo de Russell, es otro de los grandes representantes de la filosofía de la ciencia y considerado por algunos el filósofo más grande del siglo XX.[4]

(iii) El círculo de Viena formado por filósofos de principios del siglo XX, cuya idea fundamental es que cualquier enunciado científico es verificado empíricamente, con ideas diferentes acerca de cómo se relaciona el empirismo con la ciencia moderna. Entre sus integrantes se encuentran Moritz Schlick, Rudolf Carnap, Otto Neurath, Hans Hahn, Herbert Feigl y Kurt Godel; marcados por una profunda influencia de Wittgenstein.[5] Un personaje relacionado al círculo de Viena es el filósofo Karl Popper, que en oposición a las ideas del círculo, argumenta que las proposiciones científicas no son verificadas sino falsables, es decir, tienen la posibilidad de ser refutadas por medio de algún suceso en la naturaleza que las contradiga; esta postura filosófica es conocida como *falsacionismo*. [6]

(iv) El positivismo (o empirismo) lógico, también conocido como neopositivismo es un movimiento filosófico que nace con el círculo de Viena. El objetivo del neopositivismo consistía en incorporar la lógica y las matemáticas como elementos de avance en el conocimiento, dentro de una filosofía acorde con ello, y se planteaba que la ciencia podría jugar un papel destacado en la reorganización de la sociedad. Algunos participantes de este movimiento fueron A. J. Ayer, Carl G. Hempel, Paul Oppenheim, Hilary Putnam, W.V.O. Quine y Hans Reinchenbach; además de los integrantes del círculo de Viena.[7]

1.2. Las unidades de análisis.

En los años sesentas se desarrollaron varias teorías de la ciencia, en oposición al positivismo, entre ellas destacan las propuestas de N. R. Hanson, Paul Feyerabend, Stephen Toulmin, y en especial la de Thomas S. Kuhn. Y, posteriormente, en los setentas aparece una nueva generación de teóricos, que usan como base el modelo de ciencia de Kuhn, los principales son Imre Lakatos, Larry Laudan, Joseph Sneed, Wolfgang Stegmuller, Dudley Shapere

y Mary Hesse.[8]

Estos modelos filosóficos, con base en estudios históricos, señalan que la ciencia no es autónoma pues influyen factores sociales, ideológicos, psicológicos, etc.; establecen que el desarrollo de la ciencia no es lineal ni acumulativo, debido a que la aceptación de una teoría puede llevar al rechazo de otra ya establecida; y especifican que la racionalidad científica no se determina a priori, ya que la investigación empírica es la que determina su éxito. Además, los modelos implementan unidades de análisis de la ciencia (UA) que son marcos conceptuales en donde se estudia cómo se construyen y evalúan las teorías científicas.¹²

En seguida se presentan tres de estos modelos, cuya exposición es motivada por el interés de mostrar cómo se ha analizado ya el proceso de construcción de las teorías. Estos modelos, parafraseando a Ana Rosa Pérez,¹³ desarrollan marcos conceptuales que están formados por:

- Compromisos ontológicos.
Entidades y procesos que se postulan como existentes dentro de la teoría.
- Supuestos básicos.
Presupuestos que establecen el campo de fenómenos a estudiar y los problemas a resolver por la teoría.
- Compromisos metodológicos.
Criterios que se ajustan a la evaluación de la teoría.

Los compromisos ontológicos y los supuestos básicos son elementos indispensables en la interpretación que contiene una teoría científica, en tanto que los compromisos metodológicos determinan su evaluación. Y a su vez, los tres son elementos necesarios en la construcción de las teorías científicas. Además, los compromisos ontológicos y metodológicos se adhieren a alguna postura filosófica, por lo que tanto la interpretación que contiene una teoría como su construcción es guiada por la filosofía adoptada.¹⁴

¹²[8, pp. 182 y 183]

¹³La filósofa de la ciencia A. R. Pérez Ransanz escribió un artículo [8], en el que hace un breve pero sustancial análisis de los tres modelos expuestos en este capítulo; en el artículo enfatiza los criterios de evaluación que plantea cada modelo, motivada por el interés de exponer las propuestas que plantean dichos modelos para llevar a cabo un cambio de teoría.

¹⁴En el capítulo dos se profundiza esta idea, pero considerándose no de manera general a las teorías científicas sino enfocándose en las teorías físicas.

1.2.1. El modelo de Kuhn; UA: el paradigma.

Thomas S. Kuhn¹⁵ se especializó y enseñó historia de la ciencia.[9] Sus estudios históricos lo llevan a interesarse en analizar la influencia del contexto social en la realización de las producciones científicas.[10] Su obra gira alrededor del análisis de las teorías y las prácticas científicas, teniendo como herramienta: la historia de la ciencia, que analiza el desarrollo histórico de la ciencia; la epistemología, que estudia la naturaleza del conocimiento; y la psicología social, que se enfoca en el comportamiento de la sociedad.¹⁶ Kuhn considera que el mundo no cambia, sólo su visión de éste, y con ello en mente implementa el concepto de paradigma en un principio con por lo menos 22 significados distintos, cuyo nombre genérico es UA en la filosofía de la ciencia, que es el marco conceptual el cual incorpora en su modelo de ciencia.¹⁷

Kuhn plantea que hay un momento en el cual coexisten varias escuelas que tienen asociadas, cada una, una o varias teorías. Cada escuela está constituida por un grupo de científicos que, entre otras actividades, lleva a cabo la construcción de una o más teorías. Después de cierto tiempo todos los grupos, o la mayoría, deja de trabajar en su teoría y deciden seguir la de cierto grupo. A decir de Kuhn, las teorías son inconmensurables por ser conceptualmente distintas y la selección es guiada por argumentos persuasivos, en oposición con la verificación y la falsación de los positivistas, por lo que el modelo de ciencia de Kuhn es *irracionalista*. La teoría que ha sido seleccionada es la que se asocia con un paradigma, en el que se continua su articulación.

Los paradigmas son definidos por Kuhn como "(...) logros científicos universalmente aceptados que durante algún tiempo suministran modelos de problemas y soluciones a una comunidad de profesionales".¹⁸ Es decir, un paradigma es una teoría y el resultado de su aplicación. Y a la etapa en la que los científicos resuelven problemas experimentales (recoger hechos, aumentar la precisión de los objetos de medición, realizar trabajo empírico, etc) y teóricos (predecir fenómenos por medio de articular la teoría) basados en los paradigmas, que denomina ciencia normal, la considera como el criterio más claro para decir que un campo constituye una ciencia.

¹⁵El estadounidense T. Kuhn (1922 - 1996), doctor en física en Harvard, dedicó gran parte de su trabajo a la historia de la ciencia siguiendo los escritos de Alexandre Koyré, Émile Meyerson, Hélène Metzger y Annelise Maier.[9, pp. 10-12]

¹⁶[9, pp. 9-14]

¹⁷A lo largo de todo el libro [9], Kuhn deja claro la relación entre mundo y paradigmas, especifica que el mundo no cambia y que los paradigmas ofrecen visiones diferentes de éste.

¹⁸[9, pp. 14 y 15]

Kuhn indica que de los paradigmas se derivan compromisos compartidos:

- **Metafísicos.**
Postulados sobre la esencia de la naturaleza, que constituyen los compromisos ontológicos.
- **Generalizaciones simbólicas.**
Componentes formales expresados en conceptos y leyes, que establecen los supuestos básicos.
- **Valores.**
Normas sobre cómo utilizar los instrumentos adecuadamente y cómo evaluar las teorías, que especifican los compromisos metodológicos.

Y que en un nivel, de compromiso, más superior se pretende comprender el mundo por medio de extender lo aprendido.¹⁹

Los compromisos compartidos (que constituyen la construcción de una teoría, lo que incluye la interpretación que contiene una teoría y su evaluación) junto con el paradigma (soluciones concretas a través de aplicar la teoría) son parte de una estructura que Kuhn llama matriz disciplinar.²⁰ Sin embargo, originalmente, Kuhn usó el término paradigma en dos sentidos: como compromisos compartidos y como soluciones concretas; ambos sentidos en conjunto conforman el significado de paradigma que ha sido más popularizado.²¹

Para Kuhn, usar un paradigma es usar unas gafas a través de las cuales se observa el mundo, esto es, el mundo no cambia sólo su representación dada por una teoría científica. Las representaciones que proporcionan los paradigmas son conceptualmente distintas, por lo que siguiendo el modelo de ciencia de Kuhn son inconmensurables y su selección en última instancia es cuestión de persuasión; cada paradigma está asociado a una teoría.

Kuhn describe la actividad científica como un ciclo que consta de: ciencia normal, crisis, revolución y nueva ciencia normal. La ciencia normal es dirigida por cierto paradigma, aunque puede haber actividad relacionada con otra teoría que es denominada ciencia extraordinaria; la crisis surge cuando falla el paradigma debido a que la naturaleza ha violado las expectativas de

¹⁹[9, pp.83-88]

²⁰[9, pp.290-311]

²¹En lo que resta del escrito, con el término paradigma se hará referencia a su significado más amplio: construcción y aplicación de una teoría.

éste, situación conocida como anomalía; la revolución consiste en el enfrentamiento entre teorías en construcción que intentan desplazar al paradigma vigente; y la nueva ciencia normal es dirigida por el nuevo paradigma. En sus palabras:

Ciencia normal significa la investigación basada firmemente en uno o más logros científicos pasados, logros que una comunidad científica particular reconoce durante algún tiempo como el fundamento de su práctica ulterior.[9, p. 37]

El significado de las crisis es que ofrecen un indicio de que ha llegado el momento de cambiar de herramientas.[9, p. 140]

(...) aquí consideramos como revoluciones científicas aquellos episodios de desarrollo no acumulativo en los que un paradigma antiguo se ve sustituido en todo o en parte por otro nuevo incompatible con él.[9, p. 164]

A través de la lectura del discurso de Kuhn, se tiene que la construcción de una nueva teoría sucede en dos etapas diferentes de su modelo. En la etapa de ciencia normal se sigue articulando la teoría que ha sido aceptada, y es asociada con uno o varios paradigmas; mientras que en la de revolución se construyen muchas teorías que no se relacionan con los paradigmas, pero se asocian con algo similar en el sentido de que cada una de ellas tiene su propio conjunto de compromisos compartidos. En ambas etapas, tanto los paradigmas como las teorías son inconmensurables por ser conceptualmente distintos(as) y la única forma de elegir entre ellos(as) es la persuasión; no basta la lógica y la experimentación para llegar al consenso científico.

En conclusión, aún cuando Kuhn sólo da de manera esquemática el proceso de construcción de una teoría, se deduce que (siguiendo su marco conceptual) éste requiere de hacer consideraciones a priori, definir conceptos y establecer leyes, implementar alguna interpretación y valores. Claramente no propone que exista el método científico para obtener conocimiento, ni que hablar de algo no observado sea acientífico en oposición con la tesis positivista; sin embargo, es calificado de *irracionalista* por no ofrecer algún criterio racional para la selección de una teoría al considerar la persuasión como el recurso final. La filosofía de Kuhn generó gran polémica que desencadenó en arduos debates, cuenta de ello lo brinda la literatura de la filosofía de la

ciencia. El concepto de paradigma como compromisos compartidos y como soluciones concretas ha sido incorporado en la jerga de los científicos y los filósofos, convirtiéndose en el gran legado de Kuhn.

La inconmensurabilidad.

Paul Feyerabend,²² al igual que Kuhn, creía que el significado de los enunciados de observación dependen de la naturaleza de los conceptos, y ésta a su vez de la teoría usada para explicar lo observado. Además, ambos coincidían en pensar que entre las teorías se presenta la inconmensurabilidad, pero Feyerabend es considerado partidario del pluralismo teórico y Kuhn del monismo teórico. Para Feyerabend la inconmensurabilidad ocurre cuando las teorías hacen uso de hipótesis auxiliares diferentes, por lo que no son probadas directamente y con ello se tienen implicaciones ontológicas distintas; aunque, las teorías que comparten los mismos compromisos ontológicos son commensurables y siempre están en competencia. Mientras para Kuhn la inconmensurabilidad se da entre las teorías porque no pueden contrastarse al no tener conceptos con significado común; sin embargo, por medio de argumentos persuasivos una teoría es seleccionada y asociada con uno o varios paradigmas. En consecuencia, el rango de teorías inconmensurables para Kuhn es mucho mayor que para Feyerabend.²³ [11]

1.2.2. El modelo de Lakatos; UA: el programa de investigación.

Imre Lakatos²⁴ en particular se interesó en el desarrollo y progreso del conocimiento matemático, y en general su trabajo lo dirigió en torno al análisis de la ciencia y sus actividades, a partir del cual desarrolla un modelo de ciencia.[12] [13] Para esto último, hace un recuento de las diferentes postu-

²²El físico y filósofo vienés Paul Feyerabend (1924-1994) fue discípulo de Popper, y colaborador de Kuhn.

²³Un ejemplo que exhibe la diferencia entre el rango de las teorías inconmensurables para Feyerabend y para Kuhn es la transición de la teoría Ptolemaica a la teoría Copernicana, puesto que para Kuhn estas teorías son inconmensurables mientras para Feyerabend son commensurables.

²⁴El húngaro I. Lakatos (1922 - 1974) fue matemático y filósofo de la ciencia. Estuvo fuertemente influido por los escritos de Popper, como él mismo acepta, a tal grado que el modelo que desarrolla es una evolución del modelo de ciencia de Popper.[12, pp. 12 y 13]

ras filosóficas de la ciencia, cuyo argumento explicativo lo llama honestidad científica. Se reescribe aquí (en paráfrasis) como resumen y extensión de lo hasta ahora expuesto:

(a) Los justificacionistas consideran que las teorías son verificadas. Exigen la aceptación exclusiva de lo que ha sido probado experimentalmente y el rechazo de todo aquello carente de prueba.

(a') Los neojustificacionistas establecen que las teorías son probabilistas. Piden se especifique la probabilidad de cualquier hipótesis teniendo en cuenta la evidencia empírica disponible.

(b) Los falsacionistas ingenuos proponen que las teorías son refutables. Requieren la contrastación experimental de lo falsable y el rechazo de lo no falsable y de lo falsado.

(b') Los falsacionistas metodológicos estipulan que las teorías son corroboradas. Piden que se intente ver las cosas desde diferentes puntos de vista, se propongan otras teorías que anticipen hechos nuevos, y se rechacen las teorías que han sido superadas por otras con mayor poder empírico.

En este recuento, por un lado, Lakatos no incluye la postura irracionalista de Kuhn al considerarlo carente de honestidad científica. En tanto que, por otro lado, tiene una visión de la ciencia en la que las teorías son aceptadas en acuerdo con el falsacionismo metodológico de Popper; sin embargo, en esta visión las teorías no son rechazadas de inmediato cuando son refutadas y por ende su modelo de ciencia está en oposición con la *racionalidad instantánea*.²⁵

Lakatos considera las teorías describen en forma objetiva el mundo a pesar de ser creadas por la mente humana, pues hacen referencia a un mundo independiente de la mente.²⁶ Y en lugar de calificar a las teorías como falsables (ie. que pueden ser falsas), cree que es suficiente con caracterizarlas como falibles (ie. que pueden equivocarse). Entonces, en donde se lee falsacionismo se debe entender *falibilismo*. Este cambio conceptual indica que el interés para construir una teoría es el describir y explicar los fenómenos naturales, y dependiendo del campo de fenómenos a estudiar una teoría puede estar

²⁵[12, pp. 53 y 54]

²⁶[12, p.10]

equivocada o no. Por lo tanto desaparece el estatus de teoría verdadera/falsa.

El modelo de ciencia de Lakatos es denominado el falsacionismo metodológico sofisticado, el cual proporciona un marco conceptual asociado a varias teorías llamado por él programa de investigación científica (PI) que consiste en tres partes:

- Núcleo firme.
Leyes que definen parte de los supuestos básicos y de los compromisos ontológicos.
- Cinturón protector.
Hipótesis auxiliares que incluyen parte de los supuestos básicos y parte de los compromisos ontológicos.
- Heurística.
Solución de problemas por medio de los compromisos metodológicos.

Básicamente, la heurística consta de reglas metodológicas divididas en heurística negativa y positiva. La heurística negativa especifica las leyes (proposiciones aceptadas) del núcleo que están corroboradas experimentalmente conformando una base empírica infalible. La heurística positiva sugiere como cambiar las hipótesis (proposiciones que pueden ser rechazadas) del cinturón, las cuales pueden ser corroboradas o refutadas experimentalmente constituyendo una base empírica de hechos falibles. Tanto el núcleo como el cinturón incluyen proposiciones ontológicas corroboradas por medio de la lógica conformando una base no empírica infalible y falible, respectivamente.²⁷

Lakatos establece que los PI son refutados durante todo su tiempo de vida, ya que no se aplican a un gran número de fenómenos; aunque, explica, son correctos porque predicen hechos. También explica que las teorías²⁸ asociadas al mismo PI comparten el mismo núcleo y la misma heurística, pero se diferencian por tener distinto cinturón protector. Inicialmente el PI se construye con cierto cinturón protector que corresponde a una teoría (T), cuando se presentan anomalías se cambian las cláusulas del cinturón estableciéndose una nueva teoría (T'), y así sucesivamente; con lo que se tiene una sucesión

²⁷[12, pp. 66-72]

²⁸A lo que se le refiere como teoría, Lakatos le llama modelo y a veces teoría. Y define modelo como un conjunto de condiciones iniciales (posiblemente en conjunción con algunas teorías observacionales) del que se sabe que debe ser sustituido en el desarrollo ulterior del programa, e incluso cómo debe ser sustituido (en mayor o menor medida).[12, p. 70]

de teorías cada vez más complejas que simulan la realidad; además, el PI es progresivo porque predice nuevos hechos corroborados y de esta manera se evita que sea reemplazado. Le llama progresivo al PI que predice nuevos hechos corroborados.²⁹

A decir de Lakatos, en el quehacer científico se cuenta con una serie de programas de investigación en competencia; aunque, aclara, los programas de investigación pueden estar muchos años en competencia.³⁰ En su modelo de ciencia se considera que la comunidad científica debe en algún momento llevar a cabo experimentos, realizar construcciones teóricas en donde se tiene plasmado el conocimiento científico, y establecer una heurística que regula lo anterior. Así que en su modelo adopta varios recursos:

El falsacionismo metodológico sofisticado combina varias tradiciones diferentes. Hereda de los empiristas la determinación de aprender, fundamentalmente, de la experiencia. De los kantianos adopta el enfoque activista de la teoría del conocimiento. De los convencionalistas han aprendido la importancia de las decisiones en metodología.[12, p. 54]

Para Lakatos no es necesario caracterizar a las teorías como verdaderas o aproximaciones de la verdad, pero siguen estando sujetas a la evidencia empírica. También considera que el ser humano influye en la construcción del conocimiento, y en consecuencia interviene activamente en el proceso de construcción de las teorías; sin embargo, aclara que la interpretación que contiene una teoría es independiente del ser humano. Además, señala que los compromisos metodológicos tienen un papel determinante en las teorías y en general en las actividades científicas. Por lo tanto, siguiendo a Lakatos, en la elaboración de las teorías se debe atender a que: sus predicciones coincidan con los resultados experimentales, su construcción es influida activamente por el ser humano sin que intervenga en la interpretación que contiene la teoría, y los criterios metodológicos imponen su aceptación o rechazo.

En resumen, desde la perspectiva de Lakatos, se comienza con el proceso de construcción de una teoría con la heurística negativa al explicitar el núcleo firme que consta de leyes infalibles. Luego, se implementa el cinturón protector que consiste de hipótesis auxiliares falibles que protegen al núcleo en donde el orden de dichas hipótesis es decidido por el teórico. Tanto las leyes

²⁹[12, pp. 48 y 49]

³⁰[12, p. 16]

infalibles como las hipótesis auxiliares que constituyen la interpretación que contiene una teoría son independientes del ser humano. Y como el cinturón es modificable, dice Lakatos, entonces la heurística positiva establece una serie de teorías cada vez más complicados que se asemejan a la realidad.

1.2.3. El modelo de Laudan; UA: la tradición de investigación.

Larry Laudan³¹ ha enfocado su investigación principalmente al análisis de la ciencia.[14][15]³² Ha estudiado las propuestas que han hecho, a lo largo de la historia, diversos teóricos de la ciencia y desarrolló un nuevo modelo de ciencia que se ajusta con lo que denomina la *new wave*. [16]

Laudan señala que en los años 30s y 40s la ciencia era considerada consensual, posteriormente en los 50s y 60s paulatinamente decrece el rasgo consensual concedido, y a finales de los 60s se califica como no consensual con lo que se incorpora en la descripción de la ciencia el desacuerdo entre los científicos. Laudan clasifica dentro de la *new wave* a los modelos de la ciencia que dejan de enfocarse en las actividades consensuales y comienzan a concentrarse en los cambios que surgen cuando hay desacuerdos, ejemplificando los modelos de Kuhn, Feyerabend y Lakatos.³³ Sin embargo, enfatiza que los modelos proporcionados por estos filósofos, a pesar de desarrollar una explicación del desacuerdo en la ciencia, están incompletos. Kuhn no implementan criterios racionales que describan como los científicos llegan a acuerdos; Feyerabend ni si quiera cree que sea necesario el consenso científico; y Lakatos no termina de definir como se obtiene el consenso científico.³⁴

Desde la perspectiva de Laudan, la ciencia tiene por objetivo construir teorías eficaces en la resolución de problemas y ésta progresa cuando las teorías sucesivas resuelven cada vez más problemas.³⁵ En su modelo de ciencia, los problemas son de dos tipos: empíricos y conceptuales. Los problemas

³¹El filósofo estadounidense L. Laudan (1941) desarrolló un modelo de ciencia influido por los trabajos de Kuhn, Lakatos y Feyerabend, por lo que en su modelo es clave el disenso científico. También revisó los escritos de Popper, Hempel y Reichenbach.[16, p. 23]

³²El físico y filósofo Jose Marquina en [15] analiza el discurso newtoniano poniendo a prueba la UA de Laudan; las referencias que se hacen aquí sobre [14] están basadas en [15].

³³[16, pp. 5-13]

³⁴[16, pp. 19 y 20]

³⁵[14, pp. 4-8]

empíricos son hechos resueltos por alguna teoría o aún sin resolver, y se denominan anómalos cuando una teoría no los resuelve pero su rival sí. Los problemas conceptuales aparecen en una teoría cuando no es consistente con ella o con otras, y/o no utiliza conceptos de teorías más generales a las que se encuentra subordinada.

Laudan propone como unidad de análisis lo que él denomina tradición de investigación científica (TI) que consiste en un conjunto de:

- Teorías.
Conceptos y entes matemáticos que constituyen los supuestos básicos.
- Compromisos metafísicos.
Postulados acerca de las entidades existentes.
- Compromisos metodológicos.
Criterios de evaluación de las teorías.³⁶

Explica que la tradición de investigación se establece, se desarrolla y paulatinamente se deja de usar. Y, lo que determina que se trate de la misma TI son algunos elementos que pueden en algunos casos modificarse, dando lugar a la evolución de la TI.³⁷

Laudan especifica que diferentes teorías pueden asociarse con la misma TI si se ajustan a sus compromisos metafísicos y metodológicos; aunque, también puede suceder que una teoría no encaje con ninguna de las TI existentes, o que se asocie con una TI y después con otra; en consecuencia, la relación entre TI y teoría no es sencilla.³⁸

A decir de Laudan, la ciencia se desarrolla por medio de la competencia entre las tradiciones de investigación con los científicos trabajando con base en alguna o algunas de ellas siempre y cuando no difieran en aspectos fundamentales; y cada TI contiene sus propios objetivos, por lo que el progreso es siempre progreso relativo a algún conjunto de propósitos. Expresa:

Si queremos entender cómo la ciencia funciona, es claramente importante entender el proceso de razonamiento que manejan las comunidades de investigadores así como algún cambio en sus propósitos y objetivos básicos.[16, p. 47]

³⁶[14, pp. 70-73]

³⁷[14, pp. 95-100]

³⁸[14, pp. 81-85]

En consistencia con este planteamiento, Laudan establece que el consenso de la comunidad científica también está en función de los objetivos suministrados por la TI. Y a partir de esta idea desarrolla un modelo de estructura reticular para la tradición de investigación. Básicamente establece que para llegar a consenso se hace referencia al análisis de elementos teóricos consistentes en entidades observables o no, elementos metodológicos cuya función es suministrar reglas empíricas, y elementos axiológicos que implementan las metas de los científicos; sin ninguna jerarquía entre ellos,³⁹ pero interconectados en relación de mutua dependencia en lo que llama red triádica de justificación.⁴⁰

En resumen, las tradiciones de investigación proveen elementos para la construcción de las teorías, por medio de sus compromisos metodológicos, por lo que le sirven de heurística; además, a través de sus compromisos metafísicos, le suministran suposiciones que usan para implementar las interpretaciones que contienen las teorías. Y considerando la estructura reticular, al tener prioridad en pie de igualdad los problemas empíricos y conceptuales, las teorías se consideran progresivas no sólo por su afinidad con los datos experimentales sino también por su claridad conceptual. Los escritos de Laudan han generado controversia, en específico con varios señalamientos hechos por los filósofos Worrall, Harvey Siegel, Leplin y Rosenberg.[15]⁴¹

1.2.4. Comparativo.

Los teóricos de la ciencia Popper, Kuhn, Feyerabend, Lakatos y Laudan son filósofos postempiristas porque difieren en la concepción de ciencia del empirismo lógico, por lo que sus modelos pertenecen a una nueva etapa en la filosofía de la ciencia; sin embargo, también presentan desacuerdos importantes. Por ejemplo Lakatos usa la historia como herramienta al igual que Kuhn

³⁹Laudan basa su modelo de estructura reticular para la formación del consenso racional en el modelo jerárquico, el cual consiste en un método de cierto orden para llegar a acuerdos; específicamente, cuando hay desacuerdos a nivel teórico se acude al nivel metodológico, cuando el desacuerdo es a nivel metodológico se va al nivel axiológico, pero cuando el desacuerdo es a nivel axiológico ya no se tiene a donde acudir.[16, p. 41]

⁴⁰[16, pp. 62-64]

⁴¹La controversia que suscitó Laudan es ilustrada por Marquina en [15, pp. 34-39], quien señala que el modelo de ciencia propuesta por Laudan la historia se vuelve más horizontal y menos vertical. [15, p. 17] Análogamente, se puede decir que la tradición de investigación newtoniana desarrollada por Marquina resulta ser tridimensional en vez de bidimensional.[15, pp. 256 y 274]

y a diferencia de Popper, con el propósito de elaborar un modelo de ciencia que concuerde con el desarrollo histórico de la ciencia; además, es partidario del pluralismo teórico como lo son Feyerabend y Laudan.

Otra característica que ilustra las diferencias entre estos filósofos es la racionalidad. Kuhn consideraba que había consenso de manera irracional en la selección de una teoría como paradigma en la etapa de ciencia normal, y Feyerabend pensaba que no existe el consenso científico y no es necesario. Por lo que Kuhn y Feyerabend mantenían posturas que los orillaban al irracionalismo en las actividades científicas. Lakatos argumentaba que la falsación de una teoría dentro de un programa de investigación en última instancia es una cuestión de consenso racional, aunque no especifica cómo llegar a él. Laudan, por el contrario, suministra un modelo por medio del cual se llega al consenso de manera racional para la selección de una teoría que puede o no estar asociada con una tradición de investigación.

Cada UA describe el proceso de construcción de una teoría a través de sus supuestos básicos, sus compromisos ontológicos y sus compromisos metodológicos. Al conocer este proceso se determinan cuales son los constituyentes de una teoría, y a su vez el saber los constituyentes de una teoría y su proceso de construcción implica tener una definición de teoría. Y como el proceso de construcción de una teoría es explicado de diferente forma en las distintas UA (debido a que difieren en general en sus compromisos), entonces el concepto de teoría varía de una UA a otra y ello resalta la importancia de la selección por una u otra UA.

Las modificaciones en una UA indica el cambio de una teoría por otra, pero no necesariamente el cambio de una UA por otra UA⁴² pues ello depende del tipo de UA seleccionada:

En la UA de Kuhn si se modifica alguno de sus elementos, se cambia de un paradigma a otro y de una teoría a otra; cada paradigma ofrece una visión diferente del mundo.

En la UA de Lakatos se puede modificar unicamente el cinturón protector, que incluye suposiciones ontológicas, y seguir considerando el mismo programa de investigación (PI); en este caso a cada PI le puede

⁴²Entiendase el cambio de una UA por otra no como el cambio de un tipo de UA por otro tipo de UA (por ejemplo, de paradigma a tradición de investigación), sino al cambio de una UA por otra UA del mismo tipo (por ejemplo, el cambio de una paradigma P por otro paradigma P').

corresponder una serie de teorías en creciente complejidad que simulan la realidad.

En la UA de Laudan se tiene mayor flexibilidad pues se pueden modificar sus elementos, incluyendo su ontología, y considerar que aún se trata de la misma tradición de investigación científica (TI); a cada TI se le puede asociar un conjunto de teorías que comparten la misma visión del mundo.

Los modelos de Kuhn y Lakatos cambian de visión del mundo si se modifica su ontología, en contraste el modelo de Laudan admite modificaciones en su ontología sin que ello necesariamente conduzca a un cambio de visión del mundo.

Por ejemplo, considerese a la mecánica cuántica. A decir de Kuhn la mecánica cuántica es un paradigma pero no es el mismo paradigma para todos debido a que hay diferentes representaciones;⁴³ sin embargo, no se tiene un criterio racional para elegir entre las representaciones por ser inconmensurables. Para Lakatos, la mecánica cuántica es un programa de investigación, pues está dotada de un núcleo firme defendido por un cinturón protector flexible, ha sido refutado desde el principio, y consta de una elaborada maquinaria para la solución de problemas.⁴⁴ Y para Laudan la teoría cuántica es una tradición de investigación constituida por varias teorías entre ellas la mecánica cuántica.

Notese que siguiendo a Kuhn es usual llamar mecánica cuántica a la teoría y al paradigma, mientras para Lakatos la mecánica cuántica no es una teoría sino un PI asociada a varias teorías, y para Laudan la mecánica es una teoría asociada a la TI de la teoría cuántica.

⁴³[9, p.100]

⁴⁴[12, p. 14]

Capítulo 2

CONCEPTOS FUNDAMENTALES.

Al enfocar el análisis sólo en las teorías físicas, que son un sector de las teorías científicas, se tiene que existen *conceptos fundamentales* que cimientan sus construcciones. Estos conceptos permiten hacer un análisis de los enunciados teóricos para poder interpretar la estructura matemática de las teorías físicas. Para poder tener una comprensión clara del significado completo de los conceptos fundamentales, primero es necesario especificar en qué consisten distintas posturas filosóficas destacándose el realismo científico por su asociación con la objetividad que es una característica de las teorías físicas; cabe aclarar que la mecánica cuántica es popularmente interpretada en forma subjetiva, pero también puede ser interpretada en forma objetiva.

2.1. Las teorías físicas.

Las teorías científicas, de acuerdo a la revisión que se hizo en el capítulo anterior, se construyen a partir de: compromisos ontológicos que postulan las entidades y los procesos existentes, supuestos básicos que establecen el campo de fenómenos a estudiar y los problemas a resolver, y compromisos metodológicos sobre los criterios que determinan qué es el conocimiento científico y cómo se evalúan las teorías. Las teorías físicas consisten en un formalismo matemático con interpretación [17][18][19].

La interpretación de las teorías físicas se obtiene a partir del análisis semántico de los enunciados teóricos, el cual está en función del significado

de los conceptos teóricos; por lo tanto, en conexión con lo anterior, las teorías físicas se construyen por medio de un(a):

- Formalismo matemático.
Contiene parte de los presupuestos básicos formulados por medio de expresiones matemáticas.
- Interpretación.
Consta de las suposiciones semánticas que conforman el resto de los presupuestos básicos, los cuales incluyen a los compromisos ontológicos.
- Metodología.
Determina los criterios de evaluación de la teoría.

Al interpretar el formalismo de las teorías físicas se requiere especificar a que hacen referencia, para lo que se tiene un amplio espectro de opciones, y escoger un referente significa adoptar alguna postura filosófica.

El adquirir determinada filosofía conduce a orientar las actividades científicas a realizar. De tal manera que conciente o inconcientemente el físico realiza tareas filosóficas, o como escribió Bunge El físico (...) se convierte en filósofo de tiempo parcial."¹ Por lo tanto, por medio de haber analizado, en el capítulo anterior, el proceso de construcción de una teoría se hace evidente que la filosofía acompaña a la ciencia, lo cual expresó muy acertadamente T. Brody con la frase "La filosofía de la física (...) debe convertirse en una disciplina científica."²

Las teorías físicas tienen por objetivo general, al ser construidas, ofrecer explicaciones respecto al mundo físico. La construcción de una estructura matemática puede ser motivada por alguna filosofía sobre qué es el mundo, qué es el conocimiento científico, y cómo se relacionan estos dos; sin embargo, toda estructura matemática puede ser desvinculada respecto de cualquier compromiso ontológico. Las matemáticas permiten presentar los conceptos físicos de manera formal, y diferentes herramientas matemáticas pueden usarse en forma equivalente sin modificar el contenido físico puesto que éste sólo depende de la postura filosófica una vez determinado el sistema físico sobre el que se hace referencia; por ejemplo, diferentes coordenadas hacen referencia a la misma región espacial.

¹[17, pág. 27]

²[18, p. 4].

El alto nivel predictivo de todas las teorías físicas, dado por las matemáticas, ha propiciado el enorme interés por calcular hasta el grado de pensar que de eso tratan;³ sin embargo, no debe de perderse de vista que las matemáticas son necesarias para realizar calculos pero no suficientes para construir una teoría física: la filosofía es el otro ingrediente necesario. Sin una postura filosófica no hay interpretación y en consecuencia tampoco una teoría física, sólo una estructura matemática.

2.1.1. El realismo científico y otras posturas filosóficas.

En el *realismo científico* se establecen una serie de compromisos sobre qué es el mundo, lo que describen las teorías, y su relación entre ambas; además, el realismo científico puede ser asociado con el concepto de verdad: el mundo y la verdad en las teorías. El realismo científico es una postura filosófica que consta de compromisos metafísicos y epistemológicos, siendo el concepto de verdad un elemento que puede o no incluirse.

A nivel metafísico, se postula que el mundo existe independientemente de la mente del ser humano; la existencia del mundo no depende de la conciencia del ser humano. A nivel epistemológico, se establece que las descripciones teóricas constituyen conocimiento del mundo; el mundo que es independiente del ser humano se puede conocer por el ser humano. Y a nivel semántico, se considera que las proposiciones teóricas efectivamente son ciertas porque hacen referencia a aspectos del mundo; las teorías son verdaderas en función de su correspondencia con el mundo.[20] Cada nivel ofrece una tesis que cuenta con una o varias antítesis:

A) La tesis del nivel metafísico -sobre la independencia de la existencia del mundo y la mente del ser humano- se conoce como *realismo ontológico*, cuya tesis en oposición más radical es el *idealismo metafísico* en donde se postula que el mundo sólo consiste de las ideas que tiene el ser humano; en consecuencia, según el idealismo metafísico el mundo sólo existe si el ser humano es consciente de él, es decir, el ser humano crea al mundo.

B) La tesis del nivel epistemológico -respecto a que las teorías describen al mundo que es independiente de los procesos cognitivos del ser humano- se

³La idea de que la física consiste en resolver problemas matemáticos permea ampliamente el sector educativo, mientras que en la investigación científica la aplicación de la ciencia tiene prioridad muy por encima del entendimiento de ésta.

llama *realismo epistemológico*. En contraposición en el *idealismo epistemológico* se considera que las teorías científicas tratan sobre un mundo hecho por la mente del ser humano,⁴ y en el *fenomenismo* se establece que las teorías consisten únicamente de fenómenos observables.

C) La tesis del nivel semántico -según la cual las teorías científicas constan de conocimiento verdadero si tienen una correspondencia con el mundo- se denota como *realismo semántico*. En otras tesis diferentes como en el *instrumentalismo teórico* se plantea que las teorías son recursos de cálculo predictivos con adecuación empírica y no se considera la verdad o falsedad de éstas,⁵ en el *pragmatismo* se sostiene que la verdad o falsedad atribuibles a las teorías científicas han de ser entendidas en función de la evidencia empírica, y en el *relativismo* se dice que la verdad o falsedad son relativas a los contextos en que surgen.⁶

Es evidente que el realismo epistemológico implica el realismo ontológico, pues el primero presupone al segundo; sin embargo, la relación inversa no sucede siempre. Se puede suponer que el mundo es independiente de la mente del ser humano (realismo ontológico) y que las teorías nunca ofrecerán conocimiento de ese mundo en sí mismo (idealismo epistemológico),⁷ lo cual corresponde con una *visión neo-kantiana*, en cuyo caso se tiene una postura agnóstica al considerar que el mundo es inaccesible para el entendimiento del ser humano. En tanto que el realismo semántico no implica al realismo ontológico ni al realismo epistemológico, ni al revés, pues no es necesario hablar de la verdad o falsedad de una teoría para considerar dichas tesis realistas.

Ejemplos de autores partidarios del realismo científico y del realismo se-

⁴No confundir al idealismo metafísico (en el que se postula el ser humano crea al mundo) con el idealismo epistemológico (en el que se propone que las teorías tratan sobre un mundo que puede o no coincidir con el mundo del que se hace referencia en el idealismo metafísico).

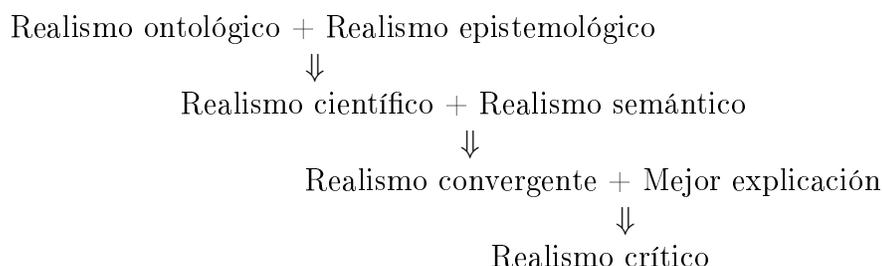
⁵Una variante del instrumentalismo teórico es el *instrumentalismo sobre entidades teóricas* en el que se establece que las entidades teóricas son sólo recursos -instrumentos- para simplificar y generalizar las proposiciones en las teorías, más no hacen referencia a la naturaleza. El instrumentalismo teórico implica el instrumentalismo sobre entidades, pero la relación inversa no es válida en general.

⁶El instrumentalismo, el pragmatismo y el relativismo no sólo son tesis opuestas al realismo semántico, sino también lo son al realismo ontológico y al realismo epistemológico.

⁷Notar que mientras el realismo epistemológico implica al realismo ontológico, el idealismo epistemológico no implica al idealismo ontológico.

mántico son Karl Popper, Mario Bunge e Ilkka Niiniluoto; y ejemplo de realistas científicos desligados del concepto de verdad son Rom Harré y Ronald Giere.[21] El realismo semántico tiene poca relevancia, a menos que se proporcione algún criterio sobre cómo las teorías corresponden al mundo y con ello poder establecer que son verdaderas. Una alternativa metodológica que se puede implementar en el realismo semántico es que el conocimiento teórico es verdadero si tiene adecuación empírica, lo cual se denomina *realismo convergente*⁸ si se incluyen los compromisos del realismo científico.

El realismo convergente no es suficiente cuando se tienen varias teorías que satisfacen la misma base empírica, entonces es necesario considerar también la que ofrezca la mejor explicación y a ello se denomina *realismo crítico*.⁹ Para discernir entre qué teoría brinda la mejor explicación se hace un análisis con base en la que proporciona la explicación más profunda, coherente y simple;¹⁰ seleccionar entre varias teorías significa que implícitamente se cree que las teorías pueden ser correctas o erróneas (ie creer que las teorías son falibles), por lo que las teorías no escogidas son aproximaciones de la verdad y la teoría seleccionada es verdadera. Vease el siguiente esquema:



⁸Laudan analiza y hace una crítica negativa en contra del realismo convergente en [16, pp. 103-137]; explica que el punto débil de los realistas consiste en calificar a las teorías como verdaderas, y no saber mantener este calificativo sin problemas, pues una teoría no tiene que ser verdadera para ser exitosa. Pero dice el filósofo Antonio Dieguez en [21] que a diferencia de lo que cree Laudan, el realismo científico puede o no incluir el concepto de verdad y por ende los realistas no lo tienen necesariamente como punto débil.

⁹Como explica Bunge en [17, pp. 18-20 y p. 109].

¹⁰Algunos escritores - como Diéguez en [21, p. 102]- consideran que la mejor explicación la ofrece la teoría que además de ser la más profunda, coherente y simple, sea la más probable. Pero es imposible asignar una probabilidad a una teoría dada, pues no hay ensemble que permita definir tal probabilidad, así que sólo puede hacerse con una interpretación subjetiva que implica la previa estimación de tal probabilidad; sin embargo, este parámetro subjetivo suele ser descartado por varios autores -como Lakatos- porque no se argumenta satisfactoriamente cuando una teoría es más probable que otra.

Consideraciones sobre la verdad.

La verdad es un concepto que dependiendo de la postura filosófica adoptada puede ser asociado a las teorías o a las entidades teóricas, influir o no en determinar qué es el mundo, y hasta no ser incluido en las descripciones teóricas; a continuación se desarrollan y amplian estas ideas:

I) El realismo semántico hace referencia a las teorías, dice que ellas se construyen para describir cómo es el mundo y que por consecuencia se espera sean verdaderas si tienen una correspondencia con él; en cambio, el *realismo intencional*¹¹ se refiere a las entidades teóricas -observacionales y no observacionales-, dice que los objetos teóricos deberán corresponder a entidades que pertenecen al mundo y que cuando ello sucede se considera que los objetos teóricos existen; por otro lado, los *materialistas* enuncian que las entidades teóricas existen si están entre los bloques de construcción del universo, por lo que adoptan el realismo respecto a las entidades pero no necesariamente respecto a las teorías.[22] En forma similar al realismo semántico, el realismo intencional y el materialismo se vuelven significativos si se brinda algún mecanismo para saber si los elementos de las teorías existen o no.

II) La diferencia entre el realismo convergente y el pragmatismo parece ser tan sutil que puede llegar a ser imperceptible, si no se es cuidadoso, pero es muy significativa. Ambos consideran que las teorías son verdaderas en función de la adecuación empírica, de ahí que pudiera no notarse la diferencia. Sin embargo, en el realismo convergente la evidencia experimental sólo es una herramienta para determinar si las teorías -lo cual incluye tanto su parte formal como su parte interpretativa-¹² son ciertas y no concluyen en modo alguno sobre lo que existe en el mundo; por el contrario, en el pragmatismo el recurso experimental es determinante para establecer lo que existe en el mundo de tal suerte que la existencia del mundo depende de las capacidades cognitivas del ser humano. Dicho de otra forma, la diferencia radica en que en el pragmatismo se incluyen compromisos opuestos a los del realismo convergente; por lo tanto, la distinción entre ambos que aparentemente era sutil

¹¹Como señala Diéguez en [21, p. 80].

¹²Se dijo al inicio de este capítulo que las teorías físicas consisten de una estructura matemática con interpretación; por lo tanto, la adecuación entre resultados teóricos y experimentales influye tanto en la parte formal como en la interpretativa de la teoría.

(o incluso imperceptible) deja de serlo. Por lo tanto el concepto verdad en el realismo convergente no influye para determinar qué es el mundo, mientras en el pragmatismo es determinante.

III) La evidencia empírica es necesaria y suele ser decisiva en cuanto a aceptar o rechazar una teoría; sin embargo, el recurso experimental que en algún momento ofreció evidencia empírica a favor de una teoría puede llegar a ofrecer nueva evidencia en contra de esta teoría. Cuando esto ocurre, puede ser que la teoría no describe correctamente los fenómenos a los que hace referencia o que se trate de un nuevo campo de fenómenos. En el primer caso la teoría debe deshecharse y construirse una nueva (ejemplo de ello es el reemplazo de los epiciclos por las orbitas elípticas en las trayectorias de los planetas), en el segundo caso la teoría se conserva para explicar ciertos fenómenos y se requiere construir una nueva teoría que explique los fenómenos del nuevo campo (por ejemplo, la mecánica newtoniana y el electromagnetismo). Por lo tanto, en vez de calificar a una teoría como verdadera/falsa parece ser más plausible sólo hechar mano del falibilismo que, como ya se ha mencionado, consiste en proponer que toda teoría puede equivocarse o no en función de su alcance que es la región del mundo para la cual es aplicable.

2.1.2. El positivismo y las UA vs realismo científico.

De la definición de realismo científico se desprende que porta una concepción objetiva del conocimiento, que se denota como *objetividad científica*, puesto que se considera que el mundo no está sujeto a la conciencia del ser humano. A continuación se hace un recuento de las posturas filosóficas asociadas al positivismo y a las unidades de análisis de Kuhn, Lakatos y Laudan, con base en el capítulo 1, y su relación con el realismo científico¹³ con la finalidad de determinar si se tratan de posturas objetivas o subjetivas.¹⁴

¹³Para que el lector no se confunda con lo términos recuerde que el realismo científico hace referencia al realismo ontológico y al realismo epistemológico (que consisten en ciertos compromisos metafísicos y epistemológicos, respectivamente), en donde puede o no incluirse el realismo semántico (que implementa el calificativo de verdad en las teorías), y que las otras variantes del realismo tienen en común los compromisos del realismo científico; puede consultar el esquema de la página 26.

¹⁴Ian Hacking en [22] confronta el realismo científico con las teorías y los experimentos; en el nivel teórico incluye la filosofía positiva de Comte, y la inconmensurabilidad de las teorías propuesta por Kuhn y Feyerabend; a nivel experimental inserta un ejemplo para evaluar el PI de Lakatos. Además argumenta el porque los teóricos al representar pueden

Positivismo:

En la postura filosófica *justificacionista*, implementada por los positivistas, se señala que las ciencias contienen conocimiento verdadero sobre el mundo que es adquirido únicamente por hechos observados; por lo tanto los positivistas establecen que el conocimiento científico hace referencia a la experiencia del ser humano y que en ello consiste el mundo, lo cual difiere del realismo científico, en consecuencia asumen una postura *antirealista*. Entre los positivistas hay opiniones diferentes respecto a si todo término no observacional es equivalente a una relación entre términos observacionales, destacan los *instrumentalistas* y los *operacionalistas*.¹⁵

Los positivistas a pesar de estar a favor de la tesis del *realismo semántico* al calificar al conocimiento de las ciencias como verdadero no se adhieren al realismo convergente, sino al *pragmatismo* porque su concepción del mundo y de las teorías científicas es subjetiva en oposición a las tesis del realismo científico; además, no consideran a las teorías falibles por lo que tampoco se adhieren al realismo crítico.

Paradigma:

Kuhn implementa en su UA que la existencia del mundo es independiente del ser humano, que es la tesis del *realismo ontológico*. En su modelo de ciencia¹⁶ las teorías son inconmensurables por ser conceptualmente distintas, pues la selección es guiada por argumentos persuasivos. La teoría que ha sido seleccionada es la que se asocia con un paradigma, su tipo de UA propuesta, que ofrece una representación del mundo y sirve como instrumento para resolver problemas. Y como el contenido de un paradigma es conocimiento de un mundo que es determinado según las habilidades del ser humano para convencer por lo que pudiera no hacerse referencia a un mundo independiente del ser humano, entonces el tipo de UA que brinda Kuhn puede no estar en concordancia con la tesis del realismo epistemológico.

ser anti-realistas, pero no así los experimentales al intervenir.

¹⁵A los positivistas que describen a los términos no observacionales como recursos -instrumentos- didácticos se les llama instrumentalistas, y cuando consideran que el significado de todo término científico debe estar dado por procedimientos (o ser uno de esos procedimientos) experimentales -operaciones- que conduzcan a la asignación de valores numéricos de datos sensoriales se les denomina operacionalistas.

¹⁶Recordar que un modelo de ciencia ofrece un estudio sobre el desarrollo de las actividades científicas, cuya unidad básica de análisis (UA) se encarga de analizar los procesos de construcción de las teorías científicas; por lo que las UA están contenidas en los modelos de ciencia.

Kuhn adopta una postura *antirealista* en el desarrollo de su UA pues usa tesis epistemológicas opuestas al realismo científico, pero es más frecuentemente denominado *relativista* porque considera que el conocimiento del mundo están en función del -es relativo al- paradigma en cuestión y no que todos los paradigmas lo conforman como sucedería si estuviera adscrito al idealismo epistemológico; además, considera que los paradigmas son falibles pero no verdaderos o aproximadamente verdaderos; en consecuencia no concuerda con la tesis del realismo semántico y por ende tampoco con el realismo convergente ni el realismo crítico.

Programa de investigación (PI):

Lakatos establece que en los PI las teorías a pesar de tratarse de construcciones mentales describen en forma objetiva los fenómenos que ocurren en la naturaleza, pues considera hacen referencia a un mundo independiente de la mente del ser humano; por lo tanto en su tipo de UA implementa los compromisos del *realismo científico*. A cada PI le puede corresponder una serie de teorías en creciente complejidad que se asemejan a la realidad, y cada conjunto de estas teorías se enfoca en cierto campo de fenómenos. Por lo tanto, Lakatos considera prudente quitar a las teorías el rango de verdad que los positivistas les adjudicaban y el de falsedad que Popper introduce con el falsacionismo, así que no está de acuerdo con el realismo semántico.

Si bien Lakatos caracteriza a las teorías de *falibles* en los PI (al igual que Kuhn en los paradigmas) y el criterio que usa para decidir si una teoría es correcta es la *evidencia empírica*, al no ser partidario del realismo semántico tampoco lo es del realismo convergente ni del realismo crítico.

Tradición de investigación (TI):

Laudan considera a las teorías como ejemplos de visiones del mundo. No está en oposición con los compromisos del *realismo científico* sobre la objetividad del mundo y de las teorías, por lo que los acepta en las TI que constan de un conjunto de teorías compartiendo los mismos compromisos y por ende la misma visión del mundo. Directamente Laudan no se opone a que las teorías son verdaderas, la tesis del realismo semántico, pero no cree que se tenga una adecuada metodología que la sustente. Según Laudan, la *base empírica* por sí sola es insuficiente por lo que el realismo convergente no es una tesis adecuada.

Laudan cree que el determinar que el conocimiento que ofrecen las teorías sea sobre el mundo, siguiendo los compromisos del realismo científico y dando

cabida al *falibilismo*, se haga únicamente por medio de contrastación entre resultados teóricos y experimentales es un error; para Laudan las teorías son correctas si son satisfactorias empírica y conceptualmente, sin que por ello admita el realismo crítico.

En resumen, de todo este zoológico de modelos de ciencia asociados con posturas filosóficas que desarrollaron varios teóricos se obtuvo que el positivismo inscrito al idealismo y con una metodología empírica, fundado por Comte, es subjetivo; el paradigma en concordancia con el realismo ontológico y con una metodología basada en la persuasión, UA desarrollada por Kuhn, es relativista; el PI que implementa los compromisos del realismo científico sin ofrecer una metodología, UA propuesta por Lakatos, es objetivo; y la TI que no está en oposición con los compromisos del realismo científico y con una metodología fundamentada en la resolución de problemas, UA implementada por Laudan, es objetiva.

Vease el siguiente cuadro:

Modelo de ciencia (de)	Unidad de Análisis	Objetiva
Positivista		X
Kuhn	Paradigma	X
Lakatos	Programa de Investigación	✓
Laudan	Tradicción de Investigación	✓

2.2. Los conceptos fundamentales en las teorías físicas.

Los elementos básicos de una teoría física son los términos teóricos.¹⁷ A través de éstos se construyen modelos físicos los cuales tienen propiedades que pueden o no cambiar debido a ciertas condiciones, las propiedades que no cambian son representadas con variables que definen a los modelos en tanto que las propiedades que sí cambian son representadas con variables que caracterizan a los modelos; las propiedades de los modelos físicos establecen los estados teóricos en los que se encuentran. Cuando una teoría consta de uno o muy pocos modelos físicos es usual llamarla modelo teórico.

El referente físico de las teorías indica la postura filosófica adoptar, entonces -a nivel semántico- se dice que las teorías son explicaciones verdaderas cuya interpretación es realista, idealista o relativa.[23] Pero, de acuerdo al análisis que se hizo en el apartado (Consideraciones sobre la verdad.) de la sección 2.1.1, en vez de tildar a las teorías como explicaciones verdaderas o falsas es más adecuado calificarlas -a nivel epistemológico- de explicaciones falibles que se asocian a alguna postura filosófica. Así que de ahora en adelante se considerará a las teorías como explicaciones falibles, por ende se hará referencia a las posturas filosóficas a nivel epistemológico (y ontológico) pero no a nivel semántico.¹⁸

Para los realistas e idealistas (a nivel ontológico y epistemológico, cada uno), los sistemas físicos son partes del mundo en interacción con otras partes del mundo descritos por modelos físicos sujetos a ciertas condiciones cuyos estados teóricos *corresponden* a los estados de los sistemas físicos; sólo en la visión neo-kantiana (a nivel ontológico realista, y a nivel epistemológico idealista) los modelos y los sistemas son equivalentes, por lo que sus estados también. Es más común usar la expresión sistema físico en vez de modelo físico. Si se tiene claro la diferencia entre ambas expresiones, entonces es plausible usar la expresión sistema físico en vez de modelo físico; no obstante, generalmente el físico no hace tal distinción porque ni siquiera es consciente

¹⁷Entiendase por términos teóricos todos los términos de una teoría, asociados tanto a observables como a inobservables, en acuerdo con su definición estricta.

¹⁸No confundir el nivel semántico (que consta de diferentes posturas filosóficas sobre como determinar que las teorías son verdaderas) y el análisis semántico (que indica el significado de las oraciones teóricas), ya que el primero no será mencionado en lo que resta de este escrito mientras que el segundo será utilizado recurrentemente de manera primordial.

de la postura filosófica adoptada que puede no estar en concordancia con la naturaleza.¹⁹ Así que, a excepción de la visión neo-kantiana, no todos los elementos de las teorías tienen una contraparte en el mundo.

Las interpretaciones de las explicaciones que ofrecen las teorías físicas empíricamente comprobadas han sido objetivas, pues no incluyen elementos asociados con la conciencia del observador sino que obedecen al realismo a nivel ontológico y epistemológico. Una excepción es la *mecánica cuántica* (o más en general las teorías cuánticas) que tiene(n) interpretaciones tanto objetivas como subjetivas, ya que a nivel ontológico se le asocian suposiciones realistas o idealistas.²⁰ Por lo tanto, sin considerar la interpretación subjetiva del formalismo de la mecánica cuántica, solamente el PI y la TI son consistentes con las teorías físicas.

2.2.1. Las categorías.

Si las teorías físicas comparten la misma postura filosófica, por consistencia, entonces deben tener los mismos compromisos metodológicos y ontológicos implicando con ello que los mismos elementos influyan en su construcción y por ende también en su constitución. Pero, como las teorías hacen referencia a diferentes sistemas (o distintos aspectos del mismo sistema) también tienen muchos elementos de los cuales difieren, que se encuentran codificados en sus ecuaciones de movimiento que se leen de manera similar debido a los elementos que comparten las teorías. Debe tenerse presente que algunos compromisos de la postura filosófica pueden cambiar parcialmente (o en su totalidad, en un caso extremo) con base en nuevos descubrimientos sobre el mundo, por lo que dependiendo del concepto de teoría que se tenga se puede considerar que se trata de una modificación a la misma teoría o que es una aportación a una nueva teoría.

Los elementos comunes y no comunes entre las teorías que se usan para definir el resto de los conceptos son elementos básicos de las teorías llamados primitivos/categorías (según Bunge²¹/Gortari).[24] El significado de los

¹⁹Bunge dice que el físico no es filosóficamente neutral, pero supone en su mayor parte inconscientemente un conjunto de credos filosóficos subjetivos.[17, p. 12]

²⁰En el siguiente capítulo se abordarán con detenimiento dos de las interpretaciones de la mecánica cuántica, una la más popular pero subjetiva y otra objetiva pero poco usual.

²¹El análisis que lleva a cabo Mario Bunge está comprometido al realismo crítico (postura que asume, como el mismo señala[17, pp. 108 y 109]), pero la referencia que se hace aquí es consistente con todas las posturas filosóficas.

conceptos definidores se obtiene considerando suposiciones semánticas que indican el objeto físico o propiedad que representan, también se usan suposiciones matemáticas que contienen las propiedades formales que satisface y suposiciones físicas respecto a las relaciones que tiene con otros símbolos físicamente significativos.²² Es importante enfatizar que, las categorías adquieren un significado completo por medio de los compromisos ontológicos de las teorías físicas que son expresados dentro de las oraciones semánticas; teniendo en cuenta esto último y qué es una categoría, se deduce que las diferentes posturas filosóficas pueden compartir algunas categorías pero no siempre con el mismo significado: las categorías pueden ser polisémicas.

En el caso del realismo científico -en concreto el realismo epistemológico- se indica que el mundo objetivo puede ser descrito, lo cual conduce de manera natural a considerar que los constituyentes del mundo se relacionan y a ello se le denomina causalidad. Dicha categoría es sobresaliente porque aparece una y otra vez codificada en las teorías físicas, a pesar de ello no siempre es aceptada por todas las corrientes filosóficas. Frecuentemente causalidad y determinismo son considerados como sinónimos, pero no lo son:

Causalidad es una característica ontológica que se asume respecto al mundo, la cual consiste en la conexión entre un sistema físico y su medio que explica el porque -las causas- de la existencia de los fenómenos que a nivel epistemológico se representa con las relaciones dentro de un modelo físico. Y determinismo es una noción epistemológica, en la que las teorías físicas establecen una relación entre ciertas variables, que se expresa por medio de ecuaciones.[18, pp.95-104]

Por lo tanto la causalidad es una propiedad ontológica de un sistema físico, mientras que el determinismo es una propiedad de la descripción de éste más no una característica esencial de él.²³ En conclusión, causalidad y determinismo difieren a nivel fundamental; sólo son compatibles si se acepta la causalidad como postulado ontológico y la teoría es determinista, pues en este caso los modelos físicos que representan a los sistemas físicos y su medio se relacionan por medio de ecuaciones para explicar la existencia de los fenómenos.²⁴ Es común encontrar posturas tanto a favor de la causalidad

²²[17, pp. 20 y 21]

²³[19, pp.10 y 11]

²⁴Los conceptos causalidad y determinismo se relacionan también con otros conceptos, en [18] y [19] se proporciona una lista extensa de referencias sobre el tema.

como en contra, así mismo es usual que las teorías sean deterministas o no con respecto a ciertas variables.²⁵

También las categorías espacio y tiempo ocupan una posición destacada en el análisis de la ciencia debido a que son conceptos necesarios para describir los fenómenos naturales, pues ellos ocurren en el espacio y el tiempo. Su significado difiere de una postura filosófica a otra, que va desde considerarlos sólo como conceptos útiles (postura positivista) hasta asociarlos como representantes de ciertos aspectos del mundo (postura realista); además, se caracterizan de distinta forma de una teoría a otra dentro de una misma corriente filosófica. A decir de A. Einstein, quien mantenía una postura realista, se tienen dos conceptos de espacio:

Como (a) cualidad posicional del mundo de los objetos materiales, y como (b) contenedor de todos los objetos materiales, consistentes con la naturaleza del espacio desde un punto de vista geométrico y cinemático, respectivamente. [25, prefacio]

Einstein dice que Newton tomó la decisión (de acuerdo al contexto histórico, la única posible y la más fructífera) de considerar al espacio como la causa del comportamiento inercial de los cuerpos a su vez que es independiente de éstos, con lo que le da al espacio un carácter absoluto en la estructura causal de su teoría; Newton establece que los cuerpos se encuentran en un sistema inercial por lo que el espacio es el (b) contenedor de todos los objetos materiales, en el que son afectados sin afectarlo. Sin embargo -continúa Einstein- al ser reemplazado el objeto material por el campo cuyas componentes dependen de cuatro parámetros espacio-temporales, el concepto de espacio de Newton queda superado; las leyes del campo en general no dependen de la selección particular de un sistema coordinado con lo cual el espacio se vuelve una característica de los campos análogo a una (a) cualidad posicional del mundo de los objetos materiales, y además no tiene un carácter absoluto.

De la mano de usar los conceptos de espacio y el tiempo, con significado (a), para describir los fenómenos naturales se encuentra el caracterizar a la causalidad como local:

La única condición de localidad generalmente aceptada es la regla de causalidad, derivada de la teoría de la relatividad, sobre que

²⁵ En el capítulo 3 se explica como se aborda en mecánica cuántica la causalidad y el determinismo, desde distintas perspectivas filosóficas.

las conexiones causales no pueden ser propagadas a una velocidad mayor a la de la luz. [18, p. 223]

La localidad al asociarse a la causalidad adquiere estatus ontológico, pero también se presenta a nivel epistemológico tal que las teorías pueden ser locales como la teoría de la relatividad o no locales como la teoría Newtoniana al presentar acción a distancia.

Teorema de Noether.

La causalidad, el espacio y el tiempo, se relacionan con el resto de las categorías por medio de las transformaciones de simetría espacio-temporales. Esto es conocido como el famoso teorema de Noether, el cual consiste en que cada principio de conservación corresponde a una simetría en la naturaleza:

Si el lagrangiano de un sistema discreto clásico²⁶ está dado por

$$L = \sum_k p_k \dot{q}_k - H(q_k, p_k), \quad p_k = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k}$$

donde H es el Hamiltoniano, q_k las coordenadas generalizadas y p_k los momentos canónicos conjugados, la acción es

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L dt = \int_{t_1}^{t_2} \left[\sum_k p_k dq_k - H(q_k, p_k) dt \right]$$

El teorema de Noether establece que si la acción permanece invariante frente a la transformación infinitesimal arbitraria

$$q_k \rightarrow q_k + \delta q_k \quad \text{y} \quad t \rightarrow t + \delta t,$$

entonces

$$\sum_k p_k \delta q_k - H(q_k, p_k) \delta t = \text{constante} \quad (2.1)$$

Así que a partir de las simetrías de la acción (ie de las transformaciones que dejan invariante la acción) se construyen las integrales de movimiento que son leyes de conservación.

²⁶El formalismo del teorema de Noether a nivel cuántico se presenta en el siguiente capítulo, pero las ideas físicas se mantienen.

El principio de conservación hace referencia a una variable física que resulta ser una categoría; la simetría en la naturaleza se refiere a las transformaciones temporales, espaciales, espacio-temporales y en espacios abstractos, con una estructura causal. Si se considera también la localidad, entonces el grupo de simetría de interés son las transformaciones de Lorentz que satisfacen el orden de las relaciones causales al asegurar que el efecto nunca anteceda a la causa.²⁷ Además, este teorema, tiene un papel muy significativo en el origen y desarrollo de las teorías físicas.

2.2.2. El positivismo y las UA vs estructura causal.

El análisis del significado de causalidad explicado en la sección anterior permite confirmar que las teorías físicas tienen una *estructura causal* o están asociadas a teorías que tienen esta estructura, es decir, que están constituidas de tal forma que contiene las causas de los fenómenos o que existen teorías que les dan fundamento, con excepción de la *mecánica cuántica*.²⁸ De la exposición del capítulo anterior sobre las posturas filosóficas asociadas al positivismo y a las unidades de análisis de Kuhn, Lakatos y Laudan, se concluye a continuación su relación con la causalidad para determinar si consideran o no la estructura causal de las teorías.

Positivismo: En la filosofía justificacionista se argumenta que la obtención del conocimiento científico consiste en extraer de la naturaleza las *leyes* que siguen los fenómenos, por lo que se deriva de esto que las ciencias son *deterministas*, pero sin buscar las *causas* de éstos con el afán de rechazar la asociación de la ciencia con la *metafísica*.

Paradigma: Kuhn sí considera a las teorías *deterministas*, pues incluyen a las *leyes* como elementos de las estructuras teóricas en su UA. Y respecto a las *causas*, aunque no las niega como componentes de las teorías físicas tampoco es una propiedad que resalte en su marco conceptual.

Programa de investigación (PI): Del discurso de Lakatos, se lee, que debido a que considera que una teoría es mejor que otra al tener mayor número de predicciones nuevas de hechos, se entiende que es crucial en la elección de

²⁷[19, p. 11]

²⁸En el siguiente capítulo se analiza la mecánica cuántica con detenimiento.

una teoría que ésta sea *predictiva* con lo que en general las teorías deben ser *deterministas*; en este modelo las *causas* no tienen un papel destacado en las teorías físicas.

Tradicción de investigación (TI): Para Laudan, las teorías son correctas si sus *resultados teóricos* coinciden con los experimentales y para ello las teorías deben ser *deterministas*. Además, cree que una teoría física debe ser escogida sobre otra(s) si proporciona mejores *explicaciones* por lo que en su UA las *causas* en las teorías son primordiales.

Como conclusión general se tiene que en el positivismo no se considera la estructura causal de las teorías, mientras que Laudan en la TI la entroniza. En tanto que Kuhn y Lakatos en sus respectivas UA no describen la estructura causal de las teorías de manera relevante.

2.2.3. Criterio de realidad de EPR.

De lo expuesto hasta el momento se tiene que las teorías físicas -en consistencia con todas la posturas filosóficas estudiadas- proporcionan explicaciones del mundo, así que la categoría causalidad es importante pues consiste en explicar el porque de los fenómenos; y como ya se ha mencionado todas las teorías físicas son objetivas a excepción de la mecánica cuántica que es interpretada en forma objetiva o subjetiva, entonces el realismo científico de entre las corrientes filosóficas estudiadas sobresale por ser objetivo. Debido a todo lo anterior, se hará en seguida un análisis con base en el realismo científico teniendo presente que las teorías físicas son explicativas.

A partir de haber analizado el proceso de construcción de las teorías físicas se volvió natural la frase hecha respecto a que las teorías físicas son representaciones que constan de un formalismo con interpretación, en donde la interpretación depende del referente y éste a su vez de la ontología asumida. En concordancia con el realismo científico si una teoría no hace referencia a (algún segmento de) la realidad objetiva,²⁹ entonces no es una teoría física; por lo que una condición necesaria para determinar si una teoría es una teoría física es que ésta cuente con al menos algunos elementos teóricos asociados con elementos de realidad, y por ende es indispensable establecer

²⁹Dentro del contexto del realismo científico por realidad objetiva se entiende el mundo objetivo (ie. independiente de la mente del ser humano).

cómo discernir si un elemento teórico hace o no referencia a algún elemento de realidad: la respuesta la ofrecen Einstein, Podolsky y Rosen.

En el famoso artículo conocido como EPR [26] (que indica las iniciales de los autores) se inicia aclarando que cualquier consideración seria de una teoría física debe tomar en cuenta que teoría y realidad objetiva son independientes, pero que los conceptos físicos de la teoría se preve correspondan con la realidad objetiva y de está forma se obtenga una representación de ella; está aclaración encaja con el realismo científico. También se especifica que el éxito de una teoría física se da si es correcta y proporciona una descripción completa. Se explica que el qué tan correcta es una teoría es juzgado por el grado de acuerdo entre las conclusiones de la teoría y la experiencia humana (que consiste de experimentos y mediciones que permiten hacer inferencias sobre la realidad), y que el requerimiento para que sea completa es que cada elemento de la realidad física debe tener una contraparte en la teoría física (que se denomina condición de completitud).³⁰ Entonces, para determinar si una teoría es completa o no, sólo falta saber cuales son los elementos de la realidad física.

De los dos últimos párrafos se obtuvieron un par de conclusiones que se encuentran relacionadas. Del primero se dedujo que para determinar si una teoría es una teoría física, es necesario saber cuando un elemento teórico hace o no referencia a algún elemento de realidad; y del segundo se infirió que para identificar si una teoría física es completa, siguiendo a EPR, es suficiente con conocer cuales son los elementos de la realidad física. En EPR se da un criterio de realidad que no es una definición por lo que no es necesario pero sí suficiente, apelando no a consideraciones filosóficas a priori sino a resultados de experimentos y mediciones, el cual dice:

Si, sin perturbar de ninguna manera un sistema, podemos predecir con certeza (ie con probabilidad igual a uno) el valor de una cantidad física, entonces ahí existe un elemento de realidad física correspondiente a está cantidad física.³¹

Este criterio explica cómo encontrar cuales son elementos de la realidad física,

³⁰Debido a que algunas teorías son tanto correctas como exitosas, se comete el terrible error de considerar teoría y realidad como lo mismo; así que suele considerarse a cualquier elemento de una teoría como real y ello conduce a una interpretación subjetiva de la naturaleza.

³¹Se recomienda al lector tomar su tiempo para analizar este criterio, y leer el artículo de EPR con detenimiento ya que ha sido un parteaguas a nivel histórico y científico.

apartir de especificar cuando es que un elemento teórico tiene una contraparte en la realidad. Por lo tanto, usandolo, se puede determinar si una teoría es una teoría física completa, con lo cual EPR proporciona una metodología para el realismo científico.

Como el objetivo de las teorías físicas es proporcionar *explicaciones* sobre el mundo, una característica que deben poseer es consistencia entre sus compromisos filosóficos y la relación de sus conceptos. En afinidad con esto, los conceptos de una teoría pueden ser modificados (por lo que también sus hipótesis) o incluso resulta plausible que una teoría sea abandonada por otra con mayor consistencia. Si se suma a EPR el desarrollo de conceptos que conlleve a relacionarse entre sí de una forma consistente con los compromisos asociados al realismo científico, lo que se obtiene es una metodología fortalecida.

EPR aplica su planteamiento a la mecánica cuántica,³² pero antes enfatiza que sus argumentos (sobre las ideas de realidad) son válidos tanto para la mecánica clásica como para la mecánica cuántica; por lo que, en concordancia con lo que se argumenta algunas líneas atrás, ambas teorías y en general todas las teorías físicas comparten *elementos comunes*.

³²En el siguiente capítulo es dedicado por completo a un análisis de la mecánica cuántica, en donde se discute si la mecánica cuántica es completa o no por lo que se aplican los argumentos planteados por EPR.

Capítulo 3

ESCENARIO DE LA MECÁNICA CUÁNTICA.

A partir del análisis sobre el trabajo de investigación que se hizo en los capítulos precedentes, se puede argumentar que en el proceso de construcción de una teoría física se requiere adoptar alguna postura filosófica para su interpretación. De entre todas las teorías físicas, la mecánica cuántica resalta por la controversia que existe en torno a las interpretaciones de su formalismo. A continuación se presenta esta teoría por medio de sus ecuaciones más representativas con una interpretación subjetiva y otra objetiva; además, se expone su relación con otras teorías y una evaluación de ella. En conjunto se tiene un *escenario de la mecánica cuántica* que motiva a explorar/construir nuevas teorías.

3.1. Estructura matemática e interpretación de la mecánica cuántica.

La interpretación más popular de la mecánica cuántica es positivista, cuyos compromisos ontológicos corresponden a una postura subjetiva [27, 28, 29]. Los primeros fenómenos cuánticos se observaron a nivel microscópico y por muchos años se describió a los sistemas cuánticos como microsistemas; sin embargo, con el paso del tiempo se han observado fenómenos cuánticos con sistemas de escalas mayores (cristales, superconductores, láseres, ...).¹

¹En los libros de texto sobre mecánica cuántica se solía describir a los sistemas cuánticos como microsistemas, mientras que en las versiones más modernas ya no sucede;

En las siguientes subsecciones se presentan los rasgos generales de la mecánica cuántica no relativista con base en [30, 31, 32, 33]. Se exponen algunas de sus interpretaciones, haciendo uso indistintamente de las diferentes versiones matemáticas que comparten, por medio de analizar sus ecuaciones más representativas. La manera de proceder es presentar el formalismo matemático por medio de algunas ecuaciones a las cuales se les da diferente significado físico de acuerdo a distintas interpretaciones:

- Formalismo matemático.

La versión matricial consiste en asociar a las variables físicas matrices (en alguna representación), teoría construida por Heisenberg, Born y Jordan en 1925; la versión ondulatoria consiste en una ecuación diferencial lineal en el espacio de configuración (i.e. en la representación de coordenadas), teoría formulada por Schrödinger en 1926; y la versión general usa notación de Dirac que consiste en términos algebraicos generales y abstractos, teoría hecha por Dirac en 1925-1926. Schrödinger demostró que las versiones matricial y ondulatoria son matemáticamente equivalentes, mientras que Dirac hizo la versión general abstracta (por lo que no está comprometida con ninguna representación) que incorpora estas versiones particulares.²

- Interpretaciones.

La interpretación ortodoxa -IO- tuvo entre sus principales fundadores y defensores a Bohr (quien era originario de Copenhague, razón por la cual también se le denomina interpretación de Copenhague), Heisenberg, Born y Dirac; y la interpretación estadística -IE- fue propuesta inicialmente por Slater y apoyada posteriormente por Einstein y Schrödinger, entre otros. En la IO, los sistemas físicos se analizan por medio de modelos de partícula-onda; en la IE, los sistemas físicos se analizan a través de usar como modelo a las partículas y se considera una colección grande de replicas del sistema físico (i.e. un ensemble, debido a ello también se le llama interpretación de ensemble) con comportamiento estadístico ondulatorio. Estas interpretaciones se podrán contrastar y entender mejor a medida que se avance en la exposición. Por el momento basta con decir que la interpretación ortodoxa obedece a una

análogamente, ocurría lo mismo en los libros de filosofía de la física.

²Ver de la Peña [30, pp. 31, 32 y 203, y capítulo 8].

filosofía subjetiva, en tanto que la interpretación estadística atiende a una filosofía objetiva.³

3.1.1. La ecuación de Schrödinger.

El postulado dinámico fundamental de la mecánica ondulatoria es la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo:

$$i\hbar \frac{\partial \psi(x)}{\partial t} = \left[-\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m} + V(x) \right] \psi(x), \quad (3.1)$$

donde \hbar es la constante de Planck, $\psi(x)$ es llamada función de onda/estado/Schrödinger, y $\hat{T} = -\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m}$ y $\hat{V} = V(x)$ son los operadores de energía cinética y energía potencial, respectivamente, con m la masa de la partícula.⁴

En la interpretación ortodoxa se hace la suposición de que el sistema físico en ocasiones se comporta -según sea el contexto- como partícula o como una onda, y que la ecuación de Schrödinger se refiere a las propiedades ondulatorias del *comportamiento de un sistema físico*. Por lo que:

Desde el punto de vista ortodoxo la función de onda ofrece una descripción completa del *estado de un sistema individual* que puede corresponder a una manifestación ondulatoria o corpuscular. Pero la función de onda no representa a una onda física ya que se encuentra en el espacio de configuración, y no contiene la trayectoria del sistema por lo que es parcialmente incorrecta la representación de partícula debido a que no hay trayectoria.⁵

³Para la exposición de la interpretación ortodoxa se seguirán los libros de texto de Messiah [32] y Cohen (et al) [33], mientras que para la de la interpretación estadística los libros de texto de de la Peña[30] y de Ballentine [31].

⁴La ecuación de Schrödinger no contiene la información del espín, considerado propiedad intrínseca de las partículas en mecánica cuántica, en sustitución se tiene una ecuación matricial para un sistema que tenga espín $\frac{1}{2}$

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H}_0 \Psi + \frac{\mu_0}{\hbar} \mathbf{B} \cdot (\hat{\mathbf{L}} + 2\hat{\mathbf{S}}) \Psi$$

donde Ψ es llamado espinor, $\hat{H}_0 = \hat{T} + \hat{V}$ con \hat{T} y \hat{V} los operadores de energía cinética y energía potencial, respectivamente, \mathbf{B} es un campo magnético externo, $\hat{\mathbf{L}}$ es el operador de momento angular orbital y $\hat{\mathbf{S}}$ es el operador de momento angular espinorial. Esta ecuación es conocida como la ecuación de Pauli, y al igual que la ecuación de Schrödinger también es un postulado.

⁵Ver Messiah [32, Capítulo II. Ondas materiales y ecuación de Schrödinger, y p. 150].

La dualidad partícula-onda es explicada dentro del principio de complementariedad de Bohr, el cual consiste en que el aspecto corpuscular y el aspecto ondulatorio son complementarios y exhibidos solamente en arreglos experimentales mutuamente excluyentes. Para obtener la descripción completa del sistema cuántico se deben considerar ambos aspectos, el corpuscular y el ondulatorio, pero éstos no se pueden observar en un solo arreglo experimental.⁶

En la interpretación estadística se hace uso de los arreglos experimentales para determinar que la ecuación de Schrödinger hace referencia a las propiedades ondulatorias del *comportamiento estadístico de una colección grande de replicas del sistema físico* (ie de un ensemble) que es descrito como partícula. Así que:

Los que siguen la interpretación de ensemble consideran que el sistema físico sólo se describe como partícula, y que la función de onda determina únicamente el *estado de un ensemble de sistemas igualmente preparados* que tiene comportamiento ondulatorio. Y aunque la función de onda no proporciona la trayectoria, se considera que el sistema cuántico sí tiene trayectoria.⁷

En un experimento el ensemble se puede obtener enviando los sistemas físicos uno a uno durante mucho tiempo, o enviando un solo pulso para acortar la duración del experimento cuidando que la densidad del haz sea suficientemente baja para garantizar que no hay interacción entre ellos.⁸ Y que un ensemble este preparado significa que las probabilidades asociadas a este quedan fijas y conocidas, la preparación puede ser teórica o experimental; en el caso experimental tanto en una preparación como en una medición el ensemble interactúa con un aparato de medición, pero la diferencia radica en que en la preparación la información obtenida sobre el ensemble es respecto a un tiempo posterior a la interacción mientras que en la medición la información es sobre un tiempo previo.⁹

Al comparar ambas interpretaciones sobre qué describe la función de onda que satisface la ecuación de Schrödinger, se observa que la IO introduce un supuesto metafísico que tiene consecuencias interpretativas significativas y con ello importantes diferencias filosóficas. Al postularse en la IO el supuesto metafísico del comportamiento del sistema físico como onda o como partícula

⁶Ver Messiah [32, p. 155].

⁷Ver de la Peña [30, pp. 38 y 39, 224, 877 y 883].

⁸Ver de la Peña [30, pp. 37 y 38].

⁹Ver Ballentine [31, pp. 45 y 46, y Cap. 8. Preparación y determinación de un estado.].

cuando lo observamos -detectamos-, significa que se está considerando que el mundo no es independiente del observador y con ello se deduce que la IO es *subjetiva*. A diferencia de la IE, en donde el sistema físico se modela con una partícula y el ensemble es el que tiene comportamiento ondulatorio, la naturaleza es independiente del observador por lo que se trata de una interpretación *objetiva*. Actualmente se cuenta con una serie de experimentos en donde se observa ambos aspectos -tanto el ondulatorio como el corpuscular- en un solo arreglo.¹⁰

La mecánica cuántica no ofrece alguna explicación causal de la ecuación de Schrödinger, pues se trata de una teoría fenomenológica, en la IO se suele considerar que no hay una causa (o que encontrarla es irrelevante) mientras en la IE se considera que tal causa existe (aunque es desconocida).

Densidad de probabilidad.

Un postulado más de la teoría -conocido como la regla de Born- es considerar que $\rho = A|\psi|^2 = A\psi^*\psi$ es la densidad de partículas en cada punto, por lo que el número total de partículas en el *sistema* es

$$\int \rho dx = A \int |\psi|^2 dx = N$$

y por convención $A = N$ tal que

$$\int |\psi|^2 dx = \frac{N}{A} = 1$$

La densidad relativa de partículas:

$$\rho_{rel} = \frac{\rho}{N} = \frac{A\psi^*\psi}{N} = \psi^*\psi = |\psi|^2, \quad \text{con } A = N \quad (3.2)$$

indica qué fracción del total de partículas está contenida en cada punto, y al integrar se obtiene:

$$\int \rho_{rel} dx = 1$$

Si se considera que el *sistema* consiste de una partícula, $\rho_{rel} dx$ indica la probabilidad de que la partícula esté en el elemento de volumen dx y la integral

¹⁰Ver de la Peña [30, p. 39].

significa que la partícula se encuentra en algún punto del espacio con toda seguridad. Por lo tanto ρ_{rel} se llama densidad relativa de partículas o densidad de probabilidad, cuyos significados (número de partículas y probabilidad, respectivamente) son diferentes.

Born en 1927 interpreta a ψ como amplitud de probabilidad.¹¹ Para hacer una descripción probabilística se debe considerar un ensemble. En la IO los resultados de *las mediciones de cada miembro del ensemble* (ie la distribución estadística de los resultados obtenidos cuando se repite la misma medición en un número grande de sistemas independientes) es representado con la misma función de onda, por lo que la probabilidad se entiende en forma subjetiva como nuestro grado de conocimiento de un sistema o el grado de confianza de nuestras predicciones sobre su comportamiento. En la IE las propiedades estadísticas del *ensemble preparado* están contenidas en una función de onda, así que la probabilidad se entiende en un sentido objetivo pues se considera mide una propiedad del sistema. Así que la función de onda entendida como amplitud de probabilidad tiene un significado parcialmente común a ambas interpretaciones, pues la probabilidad se interpreta en forma subjetiva por la IO y de modo objetivo en la IE.

3.1.2. La ecuación de Heisenberg.

Los estados que se usan para la descripción cuántica son estados puros, no mezclas. Un estado puro se puede representar con una amplitud de probabilidad o con una superposición coherente de amplitudes de estado (ie una superposición que produce interferencia), mientras que un estado mezcla no se puede representar con una amplitud sino únicamente con una superposición incoherente de estados puros. En la notación de Dirac el estado del sistema/ensemble según la IO/IE se denota a través de un ket $|\psi\rangle$, y es útil estudiarlo como elemento del espacio de Hilbert \mathcal{H} que es:

- (1) un espacio vectorial complejo

¹¹De la Peña explica en [30, pp. 42-46] que el significado de ψ como amplitud de probabilidad es común tanto en la IO como en la IE de la mecánica cuántica, pero que muchos autores lo asocian sólo a la IO; Messiah, que es uno de estos autores, llama en [32, p.48] a la IO como la interpretación estadística de la escuela de Copenhague.

si $|\psi\rangle, |\psi'\rangle \in \mathcal{H}$, entonces $\alpha|\psi\rangle + \beta|\psi'\rangle = |\alpha\psi + \beta\psi'\rangle \forall \alpha, \beta \in \mathbb{C}$,

(2) con producto interno $i(|\psi\rangle, |\psi'\rangle) \equiv \langle\psi|\psi'\rangle \in \mathbb{C}$

(donde $\| |\psi\rangle \| \equiv \sqrt{\langle\psi|\psi\rangle}$ es la norma del vector $|\psi\rangle$),

(3) completo (ie toda serie de Cauchy converge)

se tiene $\{|\psi_n\rangle\}$, donde $\forall \delta > 0 \exists N$ tal que $\| |\psi_n\rangle - |\psi_{n'}\rangle \| < \delta \forall n, n' > N$ entonces $\lim_{n \rightarrow \infty} |\psi_n\rangle = |\psi\rangle$.

Dentro del formalismo de la cuantización canónica basada en la descripción hamiltoniana de la teoría, cada variable física O está asociado a un operador lineal \hat{O} y los operadores satisfacen relaciones de conmutación.[34, 35]¹² Dirac formuló el postulado general de cuantización que relaciona el paréntesis de Poisson con el conmutador

$$[f, g]_{clas} \equiv \sum_i \left[\frac{\partial f}{\partial q_i} \frac{\partial g}{\partial p_i} - \frac{\partial f}{\partial p_i} \frac{\partial g}{\partial q_i} \right] \rightarrow \frac{1}{i\hbar} [\hat{A}, \hat{B}] \equiv \frac{1}{i\hbar} (\hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A}),$$

de tal manera que se pueden determinar los operadores; por ejemplo, el conmutador entre los operadores \hat{q}_i y \hat{p}_j (asociados a las coordenadas generalizadas y sus momentos canónicos conjugados, respectivamente) satisfacen el siguiente conmutador

$$\frac{1}{i\hbar} [\hat{q}_i, \hat{p}_j] = \delta_{ij}$$

que es el postulado de cuantización de Heisenberg.

Los valores asociados de los operadores son los eigenvalores λ_n y los valores esperados $\langle \hat{O} \rangle_\psi$. Matemáticamente los eigenvalores se obtienen aplicando

¹²En los libros de texto se usa en general la cuantización canónica que se describe aquí, pero existen otros formalismos equivalentes que no usan operadores. En la cuantización por el método de integral de trayectoria (o funcional) se usan números obtenidos a través de integrales de funcionales, y está basada en la descripción lagrangiana de la teoría.[34] En la cuantización por deformación también se usan números obtenidos por medio de una operación entre funciones denominada producto estrella, existen diferentes productos estrella en donde cada uno da lugar a un cierto orden de los operadores de la cuantización canónica.[35]

el operador a sus eigenvectores asociados $|\psi_n\rangle$ ¹³ conformando una ecuación de eigenvalores, y los valores esperados promediando los eigenvalores del operador considerando algún estado $|\psi\rangle$:

$$\hat{O}|\psi_n\rangle = \lambda_n|\psi_n\rangle \quad (3.3)$$

$$\text{y} \quad \langle \hat{O} \rangle_\psi \equiv \langle \psi | \hat{O} | \psi \rangle = \sum_n \langle \psi | \hat{O} | \psi_n \rangle \langle \psi_n | \psi \rangle = \sum_n \lambda_n |\langle \psi_n | \psi \rangle|^2, \quad (3.4)$$

respectivamente. Los valores esperados $\langle \hat{O} \rangle_\psi$ coinciden con los eigenvalores λ_n , cuando el vector de estado sobre el que se promedia es un eigenvector: $\langle \hat{O} \rangle_{\psi=\psi_n}$. Un eigenestado de cierto operador tiene asociado un valor-eigenvalor- bien definido de la variable asociada, en caso contrario un estado (que no es eigenestado) tiene diferentes valores codificados en el valor esperado. Puede ser que el ensemble se encuentre por sí solo en un eigenestado o que sea preparado, matemáticamente o físicamente, lo cual significa que se trata de asegurar que cada miembro del ensemble considerado posea el mismo valor de cierta variable.

A nivel cuántico, cada transformación de simetría

$$T = e^{i\alpha Y^a} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + i\frac{\alpha^a}{n} Y^a\right)^n,$$

donde α denota al parámetro y Y al generador tiene asociado un operador lineal

$$\hat{U}(T) = e^{i\alpha^a \hat{Y}^a} : \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H} \quad |\psi\rangle \mapsto |\psi'\rangle = \hat{U}(T)|\psi\rangle \equiv |\hat{U}\psi\rangle$$

tal que

$$|\langle \varphi' | \psi' \rangle|^2 = |\langle \hat{U}\varphi | \hat{U}\psi \rangle|^2 = |\langle \varphi | \psi \rangle|^2$$

para todo

$$|\varphi\rangle, |\psi\rangle \in \mathcal{H},$$

por lo que \hat{U} es unitario y el generador \hat{Y} es hermitiano. En conexión con el teorema de Noether, en el cual se enuncia que por cada simetría hay una carga

¹³Un conjunto de eigenvectores $\{|\psi_n\rangle\}$ es una base ortogonal para el espacio de Hilbert, donde el número de elementos del conjunto N indica la dimensión del espacio de Hilbert $\dim \mathcal{H} = N$ y por lo tanto existen N^2 operadores linealmente independientes.

conservada, el generador (del operador de la transformación de simetría) es el operador asociado a la carga conservada (correspondiente a la simetría en cuestión).

El valor esperado de un operador cambia en el tiempo de acuerdo con

$$\langle \hat{O} \rangle_\psi \equiv \langle \psi(t) | \hat{O}(0) | \psi(t) \rangle = \langle \psi(0) | e^{i\hat{H}t} \hat{O}(0) e^{-i\hat{H}t} | \psi(0) \rangle$$

donde $|\psi(t)\rangle$ y $\hat{O}(0)$ corresponden a la llamada descripción de Schrödinger, mientras $|\psi(0)\rangle$ y $\hat{O}(t)$ a la denominada descripción de Heisenberg. Así que tanto el vector de estado como el operador pueden contener la información de la evolución temporal del valor esperado del operador en cuestión.

Por lo tanto, en particular, se puede usar la ecuación de Schrödinger o la ecuación de Heisenberg que en notación de Dirac son

$$i\hbar \frac{d|n\rangle}{dt} = \hat{H}|n\rangle \quad \text{y} \quad i\hbar \frac{d\hat{f}}{dt} = [\hat{f}, \hat{H}],$$

respectivamente. Ambas ecuaciones son equivalentes, y también ambas son postulados de la teoría. La ecuación de Schrödinger es consistente con la descripción de Schrödinger y la ecuación de Heisenberg con la descripción de Heisenberg, de ahí el nombre de estas descripciones. La versión ondulatoria de la mecánica cuántica es un caso particular de la descripción de Schrödinger, puesto que se encuentra en la representación de coordenadas; análogamente, la versión matricial de la mecánica cuántica es un caso particular de la descripción de Heisenberg ya que los operadores matriciales se encuentran en alguna representación.

1. En la descripción de Schrödinger, un ejemplo de una ecuación de eigenvalores es la ecuación estacionaria (i.e. independiente del tiempo) de Schrödinger:

$$\left[-\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m} + V \right] \phi_n = E_n \phi_n. \quad (3.5)$$

Mientras que con la ecuación completa (i.e. dependiente del tiempo) de Schrödinger -ver ecuación 3.1-, cuya solución es:

$$\psi(x, t) = \sum_n c_n e^{-iE_n t/\hbar} \phi_n(x), \quad (3.6)$$

no se obtienen eigenvalores sino valores esperados de la energía.

En la IO, si el estado del sistema físico es representado por un eigenvector $|\psi_n\rangle$ de cierto operador \hat{O} asociado a cierta variable O entonces ésta tiene el eigenvalor λ_n . En caso contrario cuando el sistema es representado por un estado $|\psi\rangle$ que no es eigenestado de cierto operador, entonces la variable asociada adquiere un valor esperado $\langle\hat{O}\rangle_\psi$ que codifica los diferentes valores medidos en el ensemble.¹⁴

A decir de la IO en la ecuación estacionaria de Schrödinger (ver ec. (3.5)), cada solución ϕ_n indica que el sistema físico está caracterizado por una sola energía E_n , es decir, cada vez que se mide la energía siempre se mide el mismo valor.¹⁵ Y en la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo (ver ec. (3.1)), cada solución $\psi(x, t)$ es una función a partir de la cual se puede obtener un valor esperado de la energía $\langle\hat{E}\rangle_\psi$ que consta de todos los resultados obtenidos al medir la energía.¹⁶

Siguiendo a la IO si se tiene una función de onda $\psi(x, t)$ que no es eigenestado de la energía, por lo que solamente se conocen las probabilidades de los posibles resultados de medir la energía, la única manera de determinar el valor de la energía del sistema es medir con lo que se obtiene un eigenvalor E_n asociado a un eigenestado ϕ_n : la función de onda se colapso; en la IO el colapso es un cambio del estado del sistema de $\psi(x, t)$ a ϕ_n debido a la intervención del observador. Y como la mecánica cuántica no predice con certeza los valores de las variables físicas, en la IO se dice que la teoría es no determinista e incluso se considera que se trata de un indeterminismo ontológico; es común que se consideren como sinónimos determinismo y causalidad, por lo que se dice que la mecánica cuántica es acausal, pero como se explicó en el capítulo dos el determinismo es una propiedad de las teorías y la causalidad de la naturaleza.

En la IE, cuando la descripción de ciertas propiedades estadísticas del ensemble es representada por un eigenvector $|\psi_n\rangle$ de cierto operador \hat{O} (asociado a cierta variable O) entonces todos los sistemas físicos que lo componen tienen el mismo eigenvalor λ_n de la variable. Esto es, el ensemble se caracteriza por un valor único y bien definido de la variable en cuestión. Esta caracterización demanda que se pongan en correspondencia eigenvalor y valor de la variable para cada elemento del ensemble, pero ello representa un

¹⁴Ver Messiah [32, pp. 152 y 169].

¹⁵Ver Messiah [32, pp. 71, 72 y 169].

¹⁶Ver Messiah [32, pp. 59-71].

postulado adicional que no se hace explícito y que resulta poco natural tomando en cuenta que el resultado está determinado por la función de onda que describe solamente resultados estadísticos. En caso contrario cuando se tiene un estado $|\psi\rangle$ que no es eigenestado de cierto operador, no todos los sistemas que constituyen al ensemble tienen el mismo valor y la variable adquiere un valor esperado $\langle\hat{O}\rangle_\psi$ que codifica los diferentes valores que tienen los miembros del ensemble (ie el ensemble no puede ser caracterizado con un solo valor definido de la variable).¹⁷

Según la IE en la ecuación estacionaria de Schrödinger (ver ec. (3.5)), cada solución ϕ_n indica que el ensemble está caracterizado por una sola energía E_n , es decir, todos los miembros del ensemble poseen la misma energía.¹⁸ Y en la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo (ver ec. (3.1)), cada solución $\psi(x, t)$ es una función que indica un valor esperado de la energía $\langle\hat{E}\rangle_\psi$ que consta de todos los valores que tienen los miembros del ensemble con sus respectivas amplitudes de probabilidad.¹⁹

De acuerdo a la IE si se tiene el estado $\psi(x, t)$ de un ensemble que no es eigenestado de la energía, el ensemble está constituido de sistemas con diferentes eigenvalores de energía y cuando se mide el valor de energía de un miembro del ensemble lo que se obtiene es un eigenvalor E_n asociado al eigenestado ϕ_n de un nuevo ensemble: la función de onda se colapsa; en la IE el colapso no es más que un cambio de conocimiento del estado del ensemble de $\psi(x, t)$ al estado de un sistema con el que se construye un nuevo ensemble ϕ_n . Al igual que en la IO en la IE se dice que la mecánica cuántica es indeterminista, pero a diferencia de la IO se considera que existe la posibilidad de explicar el porqué de dicho indeterminismo.

2. En la descripción de Heisenberg, la evolución temporal de los elementos de matriz $f_{mn} = \langle m|\hat{f}|n\rangle$ de un operador \hat{f} asociado a una variable f que no depende explícitamente del tiempo es:

$$i\hbar\langle m|\frac{d\hat{f}}{dt}|n\rangle = \langle m|[\hat{f}, \hat{H}]|n\rangle,$$

y en la representación de la energía los estados son eigenestados del hamil-

¹⁷Ver de la Peña [30, p. 196].

¹⁸Ver de la Peña [30, pp. 54, 189, 215 y 216].

¹⁹Ver de la Peña [30, pp. 98 y 99].

toniano con lo que se obtiene

$$\langle m | \frac{d\hat{f}}{dt} | n \rangle = i\omega_{mn} \langle m | \hat{f} | n \rangle,$$

donde $\omega_{mn} = \frac{E_m - E_n}{\hbar}$ son las frecuencias de transición, cuya solución es:

$$\langle m | \hat{f} | n \rangle = \lambda_{mn} e^{i\omega_{mn}t} \quad (3.7)$$

con $\lambda_{mn} = \text{constante}$. Los elementos de la diagonal $\langle n | \hat{f} | n \rangle = \lambda_{nn}$ de la matriz \hat{f} son los valores esperados $\langle \hat{f} \rangle_n$ de la variable f para cada estado $|n\rangle$, si $[\hat{f}, \hat{H}] = 0$ entonces los valores esperados son los eigenvalores λ_n , cuya interpretación ortodoxa y estadística se ha dado líneas arriba; y los elementos fuera de la diagonal oscilan en función de las frecuencias de transición. En la IO las matrices se asocian a un sistema físico en tanto que en la IE a un ensemble del sistema físico.

Estados entrelazados.

Dos sistemas (1 y 2) están correlacionados si a cada estado $\psi_n(x_1)$ del sistema 1 le corresponde un estado $\phi_n(x_2)$ del sistema 2, por lo que no se tiene de manera definida cual de los estados puede realizarse. Al estado de ambos sistemas se le denomina estado entrelazado y matemáticamente debe ser representado en forma no factorizable:

$$\Psi(x_1, x_2) = \sum_n C_n \psi_n(x_1) \phi_n(x_2) \quad (3.8)$$

Siguiendo la IO esta función se asocia con los diferentes resultados de medir dos sistemas correlacionados por la acción a distancia de dicha medición, en tanto que en la IE se sigue que dicha función se asocia con un ensemble de dos sistemas correlacionados debido a que constituyen un sistema compuesto.

En la IO al considerarse que la función de onda representa las mediciones, se ha tenido que desarrollar la teoría de la medición. Básicamente se usa una función como (3.8), donde cada $\psi_n(x_1)$ representa un resultado del aparato de medición y $\phi_n(x_2)$ codifica el estado asociado al sistema que se mide. Sin embargo, se propone que medir equivale a promediar sobre los estados del instrumento con lo que obtiene un estado mezcla que no pertenece a la descripción de la mecánica cuántica; la transición de un estado puro a un estado

mezcla denominada reducción o colapso del vector de estado, no se puede hacer mediante una transformación unitaria por lo que no cumple con las leyes de la mecánica cuántica. En la IE el concepto del colapso no es necesario, la información adicional que suministra las mediciones modifica el ensemble considerado lo que conduce a pasar de un estado puro a un eigenestado específico que contribuye a la descripción de un nuevo ensemble.²⁰

3.1.3. Desigualdades de Heisenberg.

Si un sistema/ensemble (según la IO/IE) se encuentra en un eigenestado $|\psi_n\rangle$ de un operador \hat{O} , se cumple una ecuación de eigenvalores (ver ecuación (3.3)), entonces la variable O asociada a éste tiene el eigenvalor λ_n y no tiene dispersión:²¹

$$\langle(\Delta\hat{O})^2\rangle \equiv \langle(\hat{O} - \langle\hat{O}\rangle)^2\rangle = \langle\hat{O}^2\rangle - \langle\hat{O}\rangle^2 = 0. \quad (3.9)$$

Lo anterior significa en la IO que los resultados de las mediciones de la variable O es el mismo valor,²² mientras que en la IE que no haya dispersión quiere decir que la variable O tiene el mismo valor para todos los elementos del ensemble.²³ Pero cuando un sistema/ensemble (según la IO/IE) se encuentra en un estado $|\psi\rangle$ que no es eigenestado de cierto operador \hat{O} no se satisface una ecuación de eigenvalores, por lo tanto la variable correspondiente presenta dispersión $\langle(\Delta\hat{O})^2\rangle \neq 0$ codificada en el valor esperado (ver ecuación (3.9)). Esto en la IO significa que los resultados de las mediciones tienen diferente valor de O , y en la IE la dispersión quiere decir que la variable O no tiene el mismo valor para todos los miembros del ensemble.

Si un sistema tiene valores definidos a_n, b_n, \dots simultáneamente de ciertas variables A, B, \dots , entonces los operadores \hat{A}, \hat{B}, \dots asociados a éstas: cumplen con ecuaciones de eigenvalores, comparten las mismas eigenfunciones, y conmutan entre sí²⁴

$$\hat{A}|\psi_n\rangle = a_n|\psi_n\rangle, \quad \hat{B}|\psi_n\rangle = b_n|\psi_n\rangle, \quad \dots$$

²⁰Ver de la Peña [19, pp. 551-553].

²¹A la dispersión también se le llama varianza y variancia, $\Delta\hat{O} \equiv \hat{O} - \langle\hat{O}\rangle$ es la desviación de \hat{O} , y $(\Delta\hat{O})_{rcm} \equiv \sqrt{\langle(\Delta\hat{O})^2\rangle}$ es la desviación estándar

²²Ver Messiah [32, p. 168]

²³Ver de la Peña [30, pp. 215-218]

²⁴A todos los operadores que conmutan entre sí coforman el denominado conjunto maximal de operadores conmutativos.

$$[\hat{A}, \hat{B}] = 0, \quad \dots;$$

por lo tanto, cuando los operadores no conmutan entre sí sus variables asociadas no tienen valores definidos y sus dispersiones no son nulas

$$\langle (\Delta\hat{A})^2 \rangle \neq 0, \quad \langle (\Delta\hat{B})^2 \rangle \neq 0, \quad \dots$$

Ahora bien, considere dos operadores \hat{A} y \hat{B} cuyo conmutador es $i\hat{C}$

$$[\hat{A}, \hat{B}] = i\hat{C}.$$

El conmutador de las desviaciones $\Delta\hat{A}$ y $\Delta\hat{B}$ es

$$[\Delta\hat{A}, \Delta\hat{B}] = [\hat{A} - \bar{A}, \hat{B} - \bar{B}] = [\hat{A}, \hat{B}] = i\hat{C},$$

pues los números \bar{A} y \bar{B} conmutan con los operadores \hat{A} y \hat{B} y entre sí.

Lo siguiente es la demostración de las desigualdades de Heisenberg.²⁵ Primero considere la siguiente función

$$J(\alpha) = \langle (\alpha\hat{A} + i\hat{B})^\dagger (\alpha\hat{A} + i\hat{B}) \rangle,$$

donde α es un parámetro real. Y como es un resultado general que $\langle \hat{A}^\dagger \hat{A} \rangle \geq 0$, entonces

$$J(\alpha) \geq 0$$

Suponganse que \hat{A} y \hat{B} son hermitianos, por lo que $(\alpha\hat{A} + i\hat{B})^\dagger = \alpha\hat{A} - i\hat{B}$ y por ende al desarrollar

$$J(\alpha) = \alpha^2 \langle \hat{A}^2 \rangle + \langle \hat{B}^2 \rangle + i\alpha \langle \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A} \rangle \geq 0,$$

así que la función $J(\alpha)$ es una parábola que adquiere su valor mínimo cuando

$$\alpha = \alpha_m = -\frac{i\langle \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A} \rangle}{2\langle \hat{A}^2 \rangle} = \frac{\langle \hat{C} \rangle}{2\langle \hat{A}^2 \rangle},$$

el cual es

$$J_{min} = J(\alpha_m) = \frac{\langle \hat{C} \rangle^2}{4\langle \hat{A}^2 \rangle} + \langle \hat{B}^2 \rangle - \frac{\langle \hat{C} \rangle^2}{2\langle \hat{A}^2 \rangle} \geq 0;$$

²⁵La siguiente deducción de las desigualdades de Heisenberg puede encontrarse en de la Peña [30, pp. 222-224]

al multiplicar por $\langle \hat{B}^2 \rangle$ esta última expresión y simplificar, se obtiene

$$\langle \hat{A}^2 \hat{B}^2 \rangle \geq \frac{1}{4} \langle \hat{C} \rangle^2 = \frac{1}{4} |\langle [\hat{A}, \hat{B}] \rangle|^2.$$

Al repetir el mismo procedimiento, pero sustituyendo los operadores \hat{A} y \hat{B} por sus desviaciones y considerando que $[\Delta \hat{A}, \Delta \hat{B}] = [\hat{A}, \hat{B}]$ resulta:

$$\langle (\Delta \hat{A})^2 (\Delta \hat{B})^2 \rangle \geq \frac{1}{4} \langle \hat{C} \rangle^2 = \frac{1}{4} |\langle [\hat{A}, \hat{B}] \rangle|^2. \quad (3.10)$$

Este importante resultado de mecánica cuántica, tanto por su poder predictivo como por su desacuerdo interpretativo, se conoce como las desigualdades de Heisenberg.²⁶

En resumen: a partir de considerar dos operadores \hat{A} y \hat{B} cuyo conmutador es $i\hat{C}$, se puede demostrar que el valor esperado del producto de las dispersiones de sus correspondientes variables está acotado inferiormente en términos del valor esperado de su conmutador que es justo las desigualdades de Heisenberg.

Para comprender el significado de las desigualdades de Heisenberg, se suele considerar las variables canónicas conjugadas x y p que se denominan así porque el conmutador de sus operadores \hat{x} y \hat{p} asociados es $i\hbar$ y con ello las desigualdades adquieren la forma:

$$\langle (\Delta \hat{x})^2 (\Delta \hat{p})^2 \rangle \geq \frac{1}{4} \hbar^2 \quad (3.11)$$

En la IO las desigualdades de Heisenberg imponen una cota inferior al producto de las incertidumbres de mediciones simultáneas de dos variables de un sistema, como resultado si se mide una de las variables la otra queda indeterminada y es por ello que se les denomina relaciones de incertidumbre o de indeterminación. Entonces la ec. (3.11), de acuerdo a los ortodoxos, se

²⁶Si se hace el mismo procedimiento que se uso para deducir las desigualdades de Heisenberg, pero con α como un parámetro complejo en vez de un parámetro real se obtiene una condición más fuerte

$$\langle (\Delta \hat{A})^2 (\Delta \hat{B})^2 \rangle \geq \frac{1}{4} \langle \hat{C} \rangle^2 = \frac{1}{4} |\langle [\hat{A}, \hat{B}] \rangle|^2 + \frac{1}{4} |\langle \hat{A}, \hat{B} \rangle|^2.$$

interpreta diciendo que es imposible medir en un tiempo dado la posición y el momento de una partícula con un grado de precisión arbitrario.²⁷

En tanto que en la IE las desigualdades de Heisenberg imponen una cota inferior al producto de las dispersiones de dos variables de un ensemble, así que no puede haber un ensemble con valores bien definidos de esas variables que significa no puede existir un ensemble con todos los sistemas caracterizados por las variables con los mismos valores. Por lo tanto la ec. (3.11), según la IE, se interpreta diciendo que no todos los miembros del ensemble tienen el mismo valor de posición y el mismo valor de momento.²⁸

Así que no se puede considerar que una dispersión haga referencia a sólo un valor, ya que por definición considera un conjunto de valores. La IO ofrece una interpretación incorrecta de las desigualdades de Heisenberg debido a que considera cada una de las dispersiones de las desigualdades sólo representa una incertidumbre; en contraste, la IE es consistente con la formulación y derivación matemática de las desigualdades de Heisenberg pues las dispersiones pueden hacer referencia a los valores de los miembros de un ensemble. Así que, a diferencia de la IO, considerando la IE puede llevarse a cabo la verificación experimental de las desigualdades de Heisenberg a partir de medir en la mitad del ensemble una de las variables y en la otra mitad la otra variable.

Trayectorias cuánticas.

Las desigualdades de Heisenberg para los ortodoxos es una manifestación matemática del principio de complementariedad, pues las variables involucradas son complementarias en la descripción de un sistema físico (i.e. el conocimiento de una variable excluye el de la otra y ambas proporcionan información diferente); además, al considerar el caso específico de las variables posición y momento, deducen que la noción de trayectoria es ajena a la mecánica cuántica y con ello se pierde la descripción del sistema evolucionando en el espacio. Mientras que las desigualdades de Heisenberg en la IE imponen una restricción entre dispersiones estadísticas de un ensemble, pero no sobre las propiedades simultáneas de un sistema físico; así, por ejemplo, un sistema tiene tanto posición como momento definidos y posee trayectoria con lo que sigue siendo útil la descripción del sistema evolucionando en el espacio.

²⁷Ver Cohen [33, pp. 27 y 28]

²⁸Ver Ballentine [31, pp. 223-227]

3.2. Un escenario de la mecánica cuántica.

Habiéndose expuesto ya los rasgos generales del formalismo de la mecánica cuántica con dos formas de interpretarlo, IO e IE, se enriquece el estudio de la relación entre esta teoría y las UA:²⁹

En el modelo de Kuhn la mecánica cuántica es un paradigma asociado con un teoría con el mismo nombre, del cual se derivan los compromisos compartidos (ontológicos, metodológicos y supuestos básicos) y cambia al modificarse algunos de sus elementos como la interpretación que contiene la teoría correspondiente. Adherirse al tipo de UA que propone Kuhn obliga a asumir una postura relativista pues la visión del mundo depende del paradigma seleccionado, y a no considerar que la búsqueda de las causas sea parte principal del trabajo científico.

En el modelo de Lakatos la mecánica es un programa de investigación asociado con una sucesión de teorías cada vez más cercanas a la realidad, las cuales comparten el mismo núcleo (algunas de las suposiciones básicas y de los compromisos ontológicos) y la misma heurística (compromisos metodológicos), pero difieren en el cinturón protector (el resto de los supuestos básicos y de los compromisos ontológicos). Estar de acuerdo con la clase de UA que ofrece Lakatos significa adoptar una postura realista sin dar prioridad a la búsqueda de las causas sino a la corroboración experimental, pero sin ofrecer una metodología para el realismo.

En el modelo de Laudan la mecánica cuántica pertenece a un conjunto de teorías (constituidas por supuestos básicos) asociadas a la misma tradición de investigación, la teoría cuántica, las cuales comparten los mismos compromisos metafísicos y metodológicos que pueden modificarse sin que ello signifique un cambio de TI. Optar por la UA de Laudan también conduce a adoptar una postura realista, aunque considerando en forma primordial la solución de problemas conceptuales y en consecuencia la comprensión de las causas.

En la IO, el ser humano es el responsable de los fenómenos cuánticos; mientras, en la IE se deja abierta la posibilidad de que existe una causa objetiva

²⁹Recuerde que al final del capítulo uno la forma en que las teorías están subordinadas a las UA se ilustra con la mecánica cuántica.

desconocida que produce los fenómenos cuánticos. La IO encaja con el positivismo y la UA de Kuhn, y la IE con las UA de Lakatos y Laudan. Es posible encontrar que se haga referencia a las UA de Lakatos y Laudan con una ontología subjetiva, de tal manera que se obtengan otros marcos conceptuales en el que se relacionen a las teorías de la misma forma con las nuevas UA que pueden denominarse UA del tipo PI o TI.

A partir de este análisis se ejemplifica con la mecánica cuántica cómo es que las teorías están subordinadas a las unidades de análisis, pues éstos contienen los elementos necesarios para la construcción y evaluación de las teorías. Así que para el cabal entendimiento de una teoría es necesario considerar la unidad de análisis asociado.

3.2.1. La mecánica cuántica y otras teorías.

De la ecuación de Heisenberg se obtienen las siguientes ecuaciones que constituyen el teorema de Ehrenfest:

$$\langle \hat{p} \rangle = m \frac{d\langle \hat{x} \rangle}{dt} \quad y \quad m \frac{d^2\langle \hat{x} \rangle}{dt^2} = \langle F(\hat{x}) \rangle \quad (3.12)$$

donde F representa la fuerza externa generada por el potencial V , $F = -dV/dx$. Si se considera que está ecuación tiene como referente a una partícula, de acuerdo a la IO, entonces se introducen elementos no locales en la descripción; si en cambio, se lee esta ecuación estadística en concordancia con la IE, entonces se le asocia como referente un ensemble de partículas y de esta forma se tiene una descripción local del mundo.³⁰

Se suele decir que el teorema de Ehrenfest establece que la variación temporal del valor esperado de una variable dinámica converge en el límite clásico al valor de la correspondiente variable clásica, pero se puede demostrar que la trayectoria media de las partículas cuánticas difiere de la de una partícula clásica a menos que la fuerza sea lineal. También como el valor de la constante de Planck oculta el fenómeno cuántico cuando se sale de escala atómica, se dice que el límite clásico de la mecánica cuántica se obtiene cuando los números cuánticos son grandes; sin embargo, los resultados cuánticos no convergen directamente con los clásicos.

Cuando se consideran sistemas con velocidades muy grandes (ie. $v \sim c$) se reemplaza el postulado de la ecuación de Schrödinger por el postulado de

³⁰[30, pp. 249 y 250].

la ecuación de Klein-Gordon:

$$\square\phi - \frac{m^2c^2}{\hbar^2}\phi = 0, \quad (3.13)$$

con $\square = \nabla^2 - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}$, que describe partículas relativistas sin espín no interactuantes por medio de la IO o la IE.³¹

Alternativamente la teoría cuántica de campos (TCC) estudia a las partículas cuánticas relativistas, pero los sistemas físicos ya no son descritos por medio de partículas sino de campos y éstas al ser excitaciones del campo se convierten en características del estado del campo asociado. El formalismo de TCC es similar al de mecánica cuántica, pero esta vez -considerando la cuantización canónica- se asocian los campos con operadores $O(x, t) \rightarrow \hat{O}(x, t)$ siendo la razón por la cual esta teoría es conocida como segunda cuantización. El espacio de Hilbert está constituido por la suma directa de los espacios de Hilbert de los estados de $n = 0, 1, 2, \dots$ partículas, $\mathcal{H} = \mathcal{H}_{vacio} \oplus \mathcal{H}_{1part} \oplus \mathcal{H}_{2part} + \dots$, denominado espacio de Fock. Y las transformaciones del grupo de Poincare son las que relacionan los elementos del espacio de Fock, por tratarse del caso relativista.[36, 37, 38]

En TCC el sistema físico más sencillo es descrito con el campo escalar que tiene asociadas a las partículas bosónicas con espín cero no interactuantes, la ecuación de movimiento es la ecuación de Klein-Gordon (vease ec. 14) con el campo como operador de campo,³² otro campo es el vectorial y un ejemplo es el campo de Maxwell el cual se relaciona con las partículas bosónicas con espín 1 y masa cero. La interpretación dominante en TCC es la ortodoxa.

Para incluir a la gravedad en la descripción de las partículas cuánticas se ha intentado construir teorías candidatas a una teoría cuántica de la gravedad. Un ejemplo es la teoría de cuerdas en donde se postula que el sistema físico no es una partícula sino una cuerda (o una brana en un sentido más cercano al de TCC), y se deduce con el formalismo y postulados análogos a los de la mecánica cuántica que las partículas corresponden a un tipo de

³¹La versión relativista de la ecuación de Pauli, que también es un postulado, es la ecuación de Dirac:

$$\gamma_\mu \partial_\mu \Psi + \frac{mc}{\hbar} \Psi = 0, \quad (3.14)$$

con $\gamma_\mu \partial_\mu = \gamma_0 \partial_0 + \gamma_i \partial_i$, que describe partículas libres relativistas con espín a través de la IO o la IE.

³²El siguiente caso en complejidad es el campo de Dirac que se relaciona con las partículas fermiónicas con espín 1/2 no interactuantes, cuya ecuación de movimiento es la ecuación de Dirac (vease ec. 15) con el campo como operador de campo.

modos de vibración de la cuerda; una de las partículas es la partícula mensajera de la fuerza gravitacional, el gravitón. En teoría de cuerdas se pueden seguir dos caminos: uno es tratar de construir una teoría del todo en donde se incluyen las cuatro fuerzas del universo (electromagnética, gravitacional, fuerte y débil), y el otro es hacer calculos que en TCC no se pueden realizar para lo cual se usa el diccionario de la dualidad de Maldacena (en donde una teoría de cuerdas 9+1 dimensional con gravedad es equivalente a una teoría de campos 3+1 dimensional sin gravedad).[39, 40]³³

3.2.2. Evaluando a la mecánica cuántica.

La construcción de la mecánica cuántica surge a principios del siglo XX, como respuesta a la necesidad de predecir correctamente ciertos fenómenos que las teorías ya establecidas no habían conseguido. Destaca la predicción correcta de la densidad espectral de la radiación del cuerpo negro porque llevo a establecer la discretitud de la energía y la longitud de de Broglie

$$E = n\hbar\omega \quad \text{y} \quad \lambda = \frac{2\pi\hbar}{p},$$

respectivamente, donde $n = 1, 2, \dots$ y $\hbar = 1,05 \times 10^{-27}$ erg · seg es la llamada constante de Planck cuyo valor es obtenido empíricamente (ver apéndice A), tal que se relacionan a los parámetros mecánicos E y p de una partícula con los parámetros ondulatorios ω y λ de un ente que suele considerarse la misma partícula. Debido a la descripción del cuerpo negro, se introdujo el concepto de *discretitud* y se establecio el concepto de *difracción de los electrones*; en la actualidad en mecánica cuántica, se usa de manera amplia la discretitud en las variables físicas y la difracción de las partículas.³⁴

La mecánica cuántica (no relativista/relativista) no ofrece una explicación del origen del comportamiento de los sistemas cuánticos ya que es una

³³La descripción que se presenta aquí sobre la dualidad es muy esquematica, el lector interesado puede consultar [39] de nivel posgrado. La literatura respecto a teoría de cuerdas y la dualidad de Maldacena se encuentra casi siempre en los textos de divulgación y en lecturas muy avanzadas, entre el escaso material a nivel licenciatura se encuentra [40].

³⁴Ballentine en [31, pp. 1-6] dice que el fenómeno cuántico se puede ilustrar bajo los títulos discretitud, difracción y coherencia. El lector debe tener presente que dichos títulos no sólo aparecen en las teorías cuánticas, en particular no debe de considerarse que cuantizar significa discretizar sino que ciertas variables en mecánica cuántica tienen valores discretos mientras en mecánica clásica adquieren valores continuos.

teoría fenomenológica: consta de postulados que se establecen con el fin de obtener resultados que coincidan con ciertas características de los fenómenos cuánticos, por lo que es acausal. Básicamente se tiene un formalismo matemático indeterminista y no local sujeto a diferentes interpretaciones que no pueden ofrecer alguna explicación, pero sus predicciones probabilísticas concuerdan con los resultados experimentales y en este sentido se dice que la teoría funciona.

Es natural suponer que existe la posibilidad de que haya elementos del mundo que aún no se conozcan, lo cual concuerda con el hecho de calificar a las teorías como falibles. Las teorías pueden proporcionar información equivocada con respecto a ciertos fenómenos físicos porque no están considerando ciertos elementos del mundo, por lo que el que las teorías sean completas o no queda sujeto a un conjunto de fenómenos. Para determinar si una teoría es completa se debe considerar evidentemente algún criterio, y es en este punto que se vuelve fundamental los compromisos metodológicos que inherentemente están asociados a alguna postura filosófica. Al determinar si una teoría es completa por ende se responde si es la teoría final, esto es, si ya no es necesario completar la teoría o construir una nueva teoría. Como ya se ha dicho, todas las teorías físicas son interpretadas objetivamente a excepción de la mecánica cuántica que es interpretada en forma objetiva o de manera subjetiva; en consecuencia, es controversial si la mecánica cuántica es o no la teoría final.

Existen importantes esfuerzos dirigidos a defender una interpretación realista de la mecánica cuántica, uno de ellos lo ofrece E. Santos en [41]³⁵ donde concluye que:

Las dificultades para una interpretación realista de la mecánica cuántica pueden derivarse de un número de suposiciones innecesarias, adheridas a un formalismo cuántico mínimo por razones históricas. En algunos casos las dificultades son causadas por un exceso de idealización en la interpretación de los experimentos.

Santos se refiere con un formalismo cuántico mínimo a la teoría cuántica en que se asume que el formalismo y las reglas de correspondencia -

³⁵En [41] Santos expone el bosquejo de una imagen realista del mundo cuántico, para ello considera la suposición de que la mecánica cuántica es una teoría estocástica cuya azarocidad deriva de la existencia de los campos de vacío; esta suposición se estudia desde la perspectiva de la electrodinámica estocástica en el siguiente capítulo.

instrumentales- son los únicos objetos que la constituyen, en el sentido en que las regularidades estadísticas no necesitan mayor explicación.

Condición de completitud de EPR.

Si se mantiene una postura realista se considera una opción adecuada la condición de completitud que ofrecen EPR. El criterio de realidad de EPR aplicado a la mecánica cuántica se satisface si un ensemble se encuentra en un eigenestado $|\psi_n\rangle$ de cierto operador \hat{O} , ya que se predice con certeza el valor λ_n de la cantidad asociada O al operador en cuestión y por ende ésta corresponde a un elemento de realidad. Así que formalmente, el criterio de realidad aplicado a la mecánica cuántica se satisface por medio de una ecuación de eigenvalores $\hat{O}|\psi_n\rangle = \lambda_n|\psi_n\rangle$.

Considere un ensemble de sistemas correlacionados, cuyo estado se representa con la siguiente función

$$\Psi(x_1, x_2) = \sum_n C_n \psi_n(x_1) \phi_n(x_2)$$

donde cada $\psi_n(x_1)\phi_n(x_2)$ se asocia con un subensemble, $\psi_n(x_1)$ y $\phi_n(x_2)$ son eigenfunciones de los operadores \hat{A} y \hat{B} . Si se mide por ejemplo sobre el subsistema 1 la variable A y se obtiene a_j , entonces se trata del subensemble $\psi_j(x_1)\phi_j(x_2)$ y por ello se sabe que el subsistema 2 se encuentra en el estado $\phi_j(x_2)$ con lo que se predice con certeza el valor b_j de la variable B . Por lo tanto se tiene que existe un elemento de realidad asociado a la variable B , pero $\Psi(x_1, x_2)$ sólo puede determinar la probabilidad C_j de que ocurra y en consecuencia no es completa.³⁶

³⁶Ver de la Peña [19, pp. 20-23].

Capítulo 4

ELECTRODINÁMICA ESTOCÁSTICA.

La mecánica cuántica es correcta, pero no es completa debido a que los estados teóricos son incompletos de acuerdo al criterio de completitud de EPR y por lo tanto es parcialmente exitosa. Ante esta situación se pueden seguir varios caminos con respecto a esta teoría: usarla y no hacer nada más, intentar completarla, e incluso modificarla, o construir una nueva teoría, ... y en este contexto aparece la *electrodinámica estocástica*.

4.1. De la mecánica cuántica a la electrodinámica estocástica.

Se propone que para que la mecánica cuántica haga predicciones deterministas, tal que las fluctuaciones estadísticas ya no sean aleatorias, se requiere agregar a la teoría variables denominadas variables ocultas y definidas como sigue:

Si una teoría dada T contiene un conjunto de observables $\{\hat{O}\}$ que describen un sistema físico S , y existen algunas variables $\{\lambda_{HV}\}$ respecto a S que no son experimentalmente detectables dentro del campo de trabajo de T y los valores de \hat{O} pueden ser obtenidos al promediar sobre los valores de alguna λ_{HV} , entonces $\{\lambda_{HV}\}$ son llamadas variables ocultas.[28, p. 543]

Se han construido teoremas que intentan probar que tales variables conducen a resultados que están en contradicción con la mecánica cuántica,¹ lo cual se agudizó a partir del artículo de EPR (1935) donde se afirma que la mecánica cuántica es incompleta debido a que la función de onda lo es.

En 1932, antes del teorema de EPR, von Neumann formula un teorema en donde intenta demostrar la imposibilidad de añadir variables ocultas a la mecánica cuántica sin tener contradicciones con las predicciones de ésta. En 1935 Hermann² dice que la demostración del teorema de von Neumann es válido sólo para una clase muy limitada de variables ocultas: aquellas que satisfacen la aditividad de los valores esperados, por lo que no incluye a las variables correspondientes a los operadores que no conmutan. El trabajo de Hermann es ignorado provocando que dicho teorema se considerara por muchos años un elemento en contra de pretender completar la mecánica cuántica.[42]

En 1964 el físico Bell muestra, como lo hizo Hermann 29 años antes, que la demostración del teorema de von Neumann está basada en una restrictiva suposición: el requerimiento de valores esperados aditivos excluye la posibilidad de estados sin dispersión. Además, en ese mismo año Bell formula un teorema en el que afirma que la mecánica cuántica es inconsistente con las variables ocultas.[43]

En el teorema de Bell se considera un sistema de dos partículas de espín $-1/2$, tal que se preparan para moverse en dos direcciones arbitrarias \mathbf{a} y \mathbf{b} respectivamente. Además, se supone que la descripción completa del estado inicial se realiza en términos de las variables ocultas λ con distribución de probabilidad $\rho(\lambda)$. Y el valor $A = \pm 1$ de la medición de la partícula en la dirección \mathbf{a} puede depender de ésta y de las variables ocultas λ , análogamente el valor $B = \pm 1$ de la medición de la partícula en la dirección \mathbf{b} puede depender de ésta y de las variables ocultas λ . Se considera que el valor medio $P(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ del producto es

$$P(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \int d\lambda \rho(\lambda) A(\mathbf{a}, \lambda) B(\mathbf{b}, \lambda)$$

¹De entre los teoremas sobre las variables ocultas destacan el de von Neumann, Gleason, Kochen-Specker, Bell, etc, cuya exposición puede encontrarse por ejemplo en [28] y [29].

²La matemática alemana Grete Hermann (1901-1984) colaboró con Noether, Heisenberg y Nelson, entre otros reconocidos científicos. Hermann estuvo fuertemente influenciada por la visión neo-kantiana.

donde al suponer $A(\mathbf{a}, \lambda)B(\mathbf{b}, \lambda)$ postula la localidad. Con ello deduce las siguientes desigualdades que satisfacen las variables ocultas:

$$|P(\mathbf{a}, \mathbf{b}) - P(\mathbf{a}, \mathbf{b}')| \leq 1 + P(\mathbf{b}', \mathbf{b})$$

La mecánica cuántica viola estas desigualdades, pues por ejemplo si el sistema se encontraba en el estado singlete de los dos espines se calcula con esta teoría que $P(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = -\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = -\cos \theta$ donde θ representa el ángulo entre los vectores \mathbf{a} y \mathbf{b} y hay combinaciones de ángulos para los cuales se viola la desigualdad anterior. Por lo tanto, se considera que no es posible volver a la mecánica cuántica una teoría de variables ocultas tal que se conserven sus predicciones originales.

El teorema de Bell se ha mantenido vigente, de entre los demás teoremas sobre la imposibilidad de que la mecánica cuántica se convierta en una teoría completamente determinista al agregar variables ocultas, porque al igual que EPR se lleva al plano experimental.³ Los teoremas sobre las variables ocultas permiten concluir que las variables ocultas cuyos valores dependen del contexto del sistema observado y del aparato de medición pueden agregarse a la mecánica cuántica sin llevar a contradicciones,⁴ puesto que la mecánica cuántica es una descripción no local.

4.1.1. Teorías alternativas a la mecánica cuántica.

El agregar variables ocultas a la mecánica cuántica puede entenderse como el que se esta articulando la teoría, y además puede conducir a tener una interpretación realista de ella; no obstante, aún sin las variables ocultas la mecánica cuántica puede interpretarse en forma realista. Por lo tanto, el formalismo de la mecánica cuántica puede ser interpretado en forma realista o incluir nuevas variables que lleven a una interpretación realista por lo que para evitar confusiones a esto último conviene llamarlo una teoría -realista- de variables ocultas de la mecánica cuántica.

En 1952 D. Bohm formula una teoría de variables ocultas,⁵ que goza de cierta popularidad, en donde implementa la causalidad y el determinismo

³El teorema de Bell se critica -a nivel teórico- al considerar que unicamente es válido para variables no locales, mientras que la mecánica cuántica es no local; y -a nivel empírico- se cuestiona la eficiencia de los experimentos.[19, capítulo 15]

⁴A las variables cuyo valor medio es dependiente de las mediciones que puedan realizarse (o se hayan realizado) en otras partes del sistema que describen se les llama contextuales.[29, capítulo 1]

⁵La exposición sobre el modelo de Bohm está basada en [29, pp. 38-44].

en la mecánica cuántica por lo que va más allá de articularla. El modelo de Bohm contiene tres postulados:

Postulado 1. Las variables ocultas son las coordenadas espaciales de posición de las partículas con valores definidos, independientemente de que sean medidos o no, que junto con una función de onda proporcionan una descripción completa del estado de una partícula.

Postulado 2. Una solución $\psi(x, t)$ de la ecuación de Schrödinger es considerada como un campo real objetivamente existente (similar a los campos electromagnéticos), aunque se propaga en el espacio de configuración; la acción de ψ sobre la partícula es altamente no clásica, pero la partícula no actúa sobre dicho campo.⁶

Postulado 3. La ecuación de movimiento de una partícula guiada por el campo ψ debe ser tal que si la distribución de posiciones iniciales ρ de las partículas está en concordancia con lo dado por la mecánica cuántica ($\rho = |\psi|^2$), entonces la partícula se mueve en una forma que preserva esta concordancia para todos los tiempos subsecuentes.

Las trayectorias de las partículas son tomadas como objetivamente reales, tal que satisfacen la siguiente ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad \text{con} \quad \rho = |\psi|^2$$

donde $\psi = R \exp(\frac{iS}{\hbar})$ (con $R(x, t), S(x, t) \in \mathfrak{R}$) y $v(x, t)$ es la velocidad ontológica previa a la medición. La solución de la ecuación de continuidad considerando la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo toma la forma

$$v(x, t) = \frac{1}{m} \frac{\partial S}{\partial x}$$

tal que con la posición inicial de una partícula se deduce su trayectoria, pero no es posible determinar una única posición sino diferentes posibles posiciones con lo que se obtienen un conjunto de posibles trayectorias de un ensemble de

⁶De 1926 a 1927 de Broglie mantiene que una función de onda influye en el comportamiento de una partícula e intenta formular un modelo para explicar como la onda piloto guía a la partícula, por lo que al modelo de Bohm se le suele llamar modelo de Broglie-Bohm.

partículas correspondiente a ψ . Este modelo supera el nivel fenomenológico de la mecánica cuántica, pues indaga los elementos causales de esta teoría, pero no va más allá de esta teoría porque no explora sus elementos subyacentes.

Existen otro tipo de modelos teóricos denominados teorías estocásticas, las cuales reproducen los procesos cuánticos por medio de análisis sobre las fluctuaciones estadísticas aleatorias/estocásticas. Estas teorías enriquecen a la mecánica cuántica al describir las características estocásticas del sistema cuántico, por lo que van más allá de articularla.⁷ Inicialmente las teorías estocásticas explicaban el comportamiento de los sistemas cuánticos como sistemas estocásticos clásicos (como los que tienen movimiento Browniano), y posteriormente surgen teorías estocásticas que consideran que el comportamiento de los sistemas cuánticos tiene una dinámica estocástica no clásica. A una teoría de este tipo se le identifica como interpretación estocástica de la mecánica cuántica, pero estrictamente hablando no sólo interpreta el formalismo de la mecánica cuántica por lo que es más apropiado el nombre de mecánica cuántica estocástica.[44, 45]

Las teorías estocásticas en general no pretenden explicar a la mecánica cuántica desde primeros principios, por lo que son versiones más amplias que se mantienen en el nivel fenomenológico puesto que sólo son descriptivas, pero su principal ventaja es que permiten describir los fenómenos cuánticos como procesos estocásticos. La electrodinámica estocástica (EDE) es una teoría tipo mecánica cuántica estocástica, que se distingue por ser no fenomenológica al elaborarse con la intención de ofrecer explicaciones. La exposición de EDE que se presenta está basada principalmente en [46].⁸

4.1.2. La electrodinámica estocástica como UA.

La motivación de la construcción de la electrodinámica estocástica es dar fundamento a la mecánica cuántica, pues al ser esta última una teoría fenomenológica describe el comportamiento de los sistemas cuánticos pero no explica el porque de dicho comportamiento. En palabras de los autores, la construcción de la EDE:

(...) representa precisamente un intento sistemático de mirar ha-

⁷Entre las teorías estocásticas se encuentra la teoría de Fényes, de Nelson, etc, las cuales se pueden consultar en [25].

⁸De aquí en adelante se cita a los autores de [46], L. de la Peña, A. Cetto y A. Valdés, simplemente como los autores.

cia la mecánica cuántica desde fuera de ésta, con ayuda de una teoría física más profunda. Esto nos dará la posibilidad de obtener respuestas desde una perspectiva más amplia que la obtenida por sólo interpretar (o reinterpretar o malinterpretar) el formalismo.[46, p. 5]

A decir de los autores, no se puede obtener nueva física sólo interpretando sino que la interpretación viene de la física. Así que, en vez de tratar inútilmente de obtener nueva física desde la mecánica cuántica es más provechoso construir una nueva teoría que contenga nueva física.

El punto clave en la construcción de la EDE es que la mecánica cuántica puede ser extendida como una teoría estocástica. Señalan los autores que todos los campos de vacío pueden contribuir al comportamiento estocástico de la materia a nivel microscópico, pero que el vacío electromagnético es el principal a las escalas en las que la mecánica cuántica es más frecuentemente aplicada. Por lo tanto los *supuestos básicos* de la teoría consiste en un campo de fenómenos más amplio que el de la mecánica cuántica con la intención de explicarla.⁹

La EDE es construida considerando el realismo que es un principio físico fundamental, y otros primeros principios científicos derivados tales como objetividad, causalidad y localidad. Estos principios, que con anterioridad en el capítulo dos se han denominado categorías por estar presentes en toda la estructura teórica, son parte de los compromisos ontológicos que contiene la teoría. Para los autores *la hipótesis fundamental de la EDE* es que cada sistema material es un sistema estocástico abierto en contacto permanente con el campo de radiación de punto cero (que es el vacío electromagnético, razón por la cual a veces se le llama el campo de vacío), que es considerado como una componente atermica real del campo de radiación y por ende parte de los *compromisos ontológicos* de la teoría. Siguiendo un rastreo histórico de esta hipótesis se tiene que W. Nernst la introduce en 1916 [47].¹⁰ Así que *el sistema de estudio de la EDE* está compuesto de una partícula material cargada incrustada en el campo de punto cero, pero es importante aclarar que se obtiene información sobre el ensemble de dicho sistema.¹¹

⁹[46, pp. 21 y 22]

¹⁰En [47] se especifica que en los años setentas se retoma la suposición sobre la emergencia de propiedades cuánticas debido al campo de punto cero con los trabajos de T. Marshall, T. Boyer, E. Santos, P. Claverie, A. Rueda, D. Cole, L. de la Peña, A. Cetto, entre otros.

¹¹[46, pp. 21 y 22]

EDE es una teoría más profunda que la mecánica cuántica por lo que contiene nueva física incorporada por medio del campo de punto cero, donde se origina la onda de de Broglie con longitud de de Broglie λ_B .¹² La onda de de broglie es una onda tridimensional real, que acompaña a la partícula como si guiara su movimiento (en analogía con la onda guía de de Broglie), con lo cual se enfatiza que la partícula mantiene sus propiedades corpusculares y la onda es la que tiene las propiedades ondulatorias.

Debido a que la EDE es una teoría que en cierto sentido tiene como teoría efectiva a la mecánica cuántica con la IE, entonces hereda la extraordinaria verificación experimental de ésta y una interpretación realista. Por lo tanto los *compromisos metodológicos* a los que se adhieren los autores para evaluar a EDE son la verificación experimental y la nueva física, de tal manera que el principal criterio de evaluación de su teoría es un mejor entendimiento del fenómeno cuántico. Los autores concuerdan con el criterio de realidad de EPR, pero debido al comportamiento estocástico del campo de vacío sólo es determinista a nivel probabilístico.

El campo de fenómenos de estudio de la EDE.

La premisa central de la EDE para los autores es que el campo de punto cero es visto como la fuente del comportamiento cuántico de la materia. Por lo que a decir de los autores *la conclusión más significativa de la EDE* es que las propiedades cuánticas de la materia y la radiación no son inherentes a estos sistemas, sino propiedades emergentes debido a su interacción: el fenómeno cuántico emerge de un proceso estocástico más profundo.¹³ La EDE deriva los siguientes postulados de la mecánica cuántica:

- La ecuación de Schrödinger.
- La regla de Born.
- El espín del electrón.
- La ecuación de Heisenberg.
- El conmutador de \hat{x} y \hat{p} .

Así que, EDE es una teoría enfocada en el origen de la cuantización; aunque, dentro de su área de trabajo se ha derivado también un conjunto de fenómenos cuánticos que coinciden con los de la electrodinámica cuántica

¹²El desarrollo sobre como se incorpora la longitud de de broglie y la onda de de Broglie por medio del campo de punto cero se puede consultar en [46, capítulo 9].

¹³[46, pp. 21 y 22, capítulos 3 y 4]

no relativista:¹⁴ los tiempos de vida atómicos finitos, el corrimiento atómico Lamb, la fuerza de Casimir y la fuerza de van der Waals.

El listado de derivaciones que hace EDE por medio del campo de punto cero, respalda la afirmación de la existencia de este campo.¹⁵ A pesar de ello, existen argumentos en contra de su existencia entre los principales el que no activa los fotodetectores y que no se observan sus efectos gravitacionales. Sobre lo primero se han hecho modelos de fotodetectores compatibles con las fluctuaciones del campo; y con respecto a lo segundo se asocia al problema de la constante cosmológica por lo que corresponde a un sector más amplio de la física,¹⁶ por lo cual no se considera prioritario en EDE ya que rebasa los límites de su campo fenomenológico.

EDE enuncia el siguiente principio cosmológico: el campo producido en un punto dado por todos los dipolos en el Universo debe ser igual al campo estocástico que actúa en cada partícula sobre las partículas. Este principio rebasa los límites del campo de investigación de EDE, pero es importante pues determina la escala de la constante de Planck con parámetros cosmológicos.¹⁷ Con base en ello, los autores especulan que las fluctuaciones de la densidad de materia en las escalas cosmológicas podrían producir fluctuaciones locales del valor de \hbar y señalan que su investigación es tarea de los cosmólogos.

El estudio del cuerpo negro, que llevó a introducir la constante de Planck y el concepto de fotón, desde la perspectiva de EDE considerando la interacción entre la materia y el campo permite obtener la ley de Planck sin la necesidad de introducir ninguna suposición de discretitud (ver apéndice B). Por lo tanto, los autores explican que en EDE el fotón aparece como un paquete del campo de radiación que resulta de su interacción con la materia y que un mejor entendimiento de su naturaleza requiere extender la teoría al estudio

¹⁴La electrodinámica cuántica es una TCC, por lo que el sistema de estudio es un campo con las partículas son excitaciones de éste, y se postula su cuantización. Mientras en EDE el sistema es la(s) partícula(s) inmersa(s) en el campo de punto cero, y la cuantización del campo se deriva de su interacción con la materia. En EDE el campo es el responsable del comportamiento cuántico de la(s) partícula(s), pero hasta el momento no se ha estudiado su dinámica a diferencia de la electrodinámica cuántica.

¹⁵La derivación de los tiempos de vida atómicos finitos, del corrimiento atómico Lamb, las referencias de las derivaciones de las fuerzas de Casimir y de van der Waals, y la derivación del espín del electrón se encuentran en [46, capítulo 6].

¹⁶Ver [46, pp. 95 y 96].

¹⁷Los pasos a seguir para determinar la escala de la constante de Planck puede verse en [46, capítulo 9].

del sistema completo del campo-materia.¹⁸

Extender el campo de fenómenos de EDE implica quitar por ejemplo la reducción del espacio fase al espacio de configuración y la restricción de velocidades no relativistas. Además EDE podría ampliarse al estudio de la gravedad cuántica, un camino consiste en considerar las fluctuaciones del espacio tiempo como las responsables de la estocasticidad fundamental del mundo cuántico. Los autores consideran que las teorías actuales de gravedad cuántica fundamentadas en la relatividad general y la mecánica cuántica transfieren los problemas y confusiones de la teoría cuántica actual.¹⁹

4.2. Fundamentación realista y causal de la mecánica cuántica.

El sistema de interés de la EDE es una partícula cargada inmersa en el campo de punto cero,²⁰ donde $\mathbf{E}(\mathbf{x}, t)$ representan la componente eléctrica de este campo fluctuante por lo que es una variable estocástica. A partir de la electrodinámica clásica se puede obtener la ecuación de movimiento de la partícula (de masa m y carga e) de dicho sistema, considerando que ésta debido a su aceleración radia un campo eléctrico \mathbf{E}_{rad} , que está sujeta a una fuerza externa no electromagnética $\mathbf{f}(\mathbf{x})$. La forma aproximada de dicha ecuación, considerando una descripción no relativista y la aproximación de onda larga,²¹ es la ecuación de Abraham-Lorentz:

$$m\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + m\tau\dddot{\mathbf{x}} + e\mathbf{E}(t) \quad (4.1)$$

donde el término $m\tau\dddot{\mathbf{x}} = e\mathbf{E}_{rad}(t)$ es la fuerza de reacción de radiación de la partícula debido a su aceleración con $\tau = 2e^2/3mc^3$, y la expresión $e\mathbf{E}(t)$ es la fuerza de Lorentz del campo de punto cero. Para obtener la ecuación de Abraham-Lorentz se pueden seguir dos caminos, en ambos casos se parte de un hamiltoniano regularizado causal; sin embargo en uno de ellos se preserva la causalidad y en el otro no, pero por consistencia con la teoría (y porque ésta se construye en forma causal, pues describe más cercanamente el fenómeno

¹⁸Ver [46, capítulo 10, sección 3].

¹⁹Ver [46, capítulo 10, sección 4].

²⁰La información presentada en esta subsección está basada en [46, capítulo 4].

²¹La aproximación de onda larga consiste en considerar únicamente las longitudes de onda grandes de un campo (o equivalentemente en considerar sólo las frecuencias pequeñas) de tal manera que sólo se considera la dependencia temporal de éste.

cuántico) si se inicia con un hamiltoniano causal entonces se debe seguir el camino causal.²²

4.2.1. Sobre la deducción de la ecuación de Schrödinger.

De la mecánica cuántica estocástica se puede deducir una ecuación tipo Schrödinger, pero para poder obtener la ecuación de Schrödinger se deben fijar ciertos parámetros tal que en uno de ellos se incluya \hbar sin ningún argumento físico. En cambio, en EDE se obtiene la ecuación de Schrödinger de tal manera que la inclusión de \hbar se lleva a cabo por medio de la densidad de energía espectral del campo de punto cero.[48]

Debido a que el campo de punto cero es estocástico, sus realizaciones específicas para un tiempo dado son desconocidas, así que en vez de considerar a una partícula (con masa m y carga e) se considera un ensemble del sistema compuesto.²³ Por lo tanto, se hace un análisis estadístico -haciendo uso de (4.1)- en el que se obtiene la ecuación de movimiento de $Q \equiv \overline{R}^{(i)}$ donde $\overline{R}^{(i)}$ es el promedio sobre todas las realizaciones del campo $\{(i)\}$ de la densidad de puntos R en el espacio fase de la partícula. La densidad de probabilidad promediada $Q(\mathbf{x}, \mathbf{p}, t)$ ofrece información sobre como las partículas del ensemble están distribuidas en la vecindad de un punto (\mathbf{x}, \mathbf{p}) al tiempo t .²⁴

²²En el camino acausal para obtener la ecuación de Abraham-Lorentz, se descarta los movimientos relativistas y la dependencia espacial de los modos del campo que es la denominado aproximación de onda larga. En este proceso para obtener dicha ecuación a la masa -desnuda- se le agrega una contribución infinita con lo cual se obtiene una nueva masa -vestida- que es infinita, por lo que se necesita hacer un procedimiento denominado renormalización sobre la masa que es infinita que consiste en un corte en la frecuencia del campo de radiación que se conoce como regularización; sin embargo, con este camino a seguir se tienen efectos no causales debido a las aproximaciones hechas. Por el otro camino, el causal, se considera que el movimiento es independiente de la polarización -además de no relativista- y un tiempo efectivo s_0 que se necesita para que la partícula sienta el efecto del campo radiado -que implica la aproximación de onda larga-. Dicho tiempo efectivo se traduce en considerar una estructura efectiva de la partícula con radio efectivo $a = cs_0$, así que la ecuación de Abraham-Lorentz es válida para $t > s_0 = a/c$ con lo cual ya no se tienen efectos no causales y la renormalización sobre la masa es una consecuencia natural. Ver [19, capítulo 3].

²³En aras de la simplicidad en lo que sigue de este apartado no se presentaran las ecuaciones explícitamente, en general, sino que se trazara un bosquejo del camino hacia la ecuación de Schrödinger.

²⁴La ecuación de movimiento de Q es una ecuación de Fokker-Planck generalizada (incluye ruido correlacionado), en tanto que el movimiento Browniano es descrito con una

Luego se toma en cuenta la siguiente consideración física que es indispensable para el resto de la deducción de la ecuación de Schrödinger. El sistema físico completo, que es la partícula y el campo de vacío, después de empezar a interactuar es tal que los principales efectos del campo de vacío sobre la partícula es debido a los modos de frecuencia más altos; sin embargo, cierto tiempo denominado tiempo Markoviano²⁵ $t_M = \hbar/mc^2$ (porque la aproximación Markoviana es válida, lo cual significa que los procesos estocásticos no tienen memoria) el sistema se acerca al equilibrio:

El equilibrio se puede entender en términos de la condición de balance de energía que indica no hay variación de la potencia de la energía promedio de todas las realizaciones:

$$m\tau\overline{\ddot{\mathbf{x}}^2}^{(i)} = \frac{e}{m}\overline{\mathbf{p} \cdot \mathbf{E}}^{(i)} \quad (4.2)$$

donde el lado izquierdo representa la potencia de la energía promedio perdida por la partícula - cedida al campo de fondo por medio de la fuerza de reacción de radiación- a lo largo de su trayectoria, y el lado derecho representa la potencia de la energía promedio ganada por la partícula -cedida por el campo de fondo- almacenada en las fluctuaciones del momento.

En tales condiciones los términos radiativos de la ecuación de movimiento, que consisten en aquellos términos que dependen del campo radiado y del campo estocástico cuyo origen se puede rastrear desde la ecuación (4.1), se pueden despreciar.

El primer paso es introducir la aproximación Markoviana en la ecuación de movimiento de Q , tal que se obtiene una ecuación más simplificada. El siguiente paso es cambiar la descripción de la densidad de probabilidad promediada del espacio fase al espacio de configuración, pues la ecuación de Schrödinger en la descripción cuántica es hecha en términos de la función

ecuación de Fokker-Planck (no generalizada, con ruido descorrelacionado); por lo tanto, el movimiento de una partícula cuántica no es un movimiento browniano. En los ochentas y noventas EDE no describía correctamente los sistemas sujetos a fuerzas no lineales, pues utilizaba una ecuación de Fokker-Planck que (como se acaba de decir) no alcanza el régimen cuántico; además, nunca se alcanzó con la metodología adoptada la ecuación tipo Schrödinger. Para más detalles ver [46, pp. 108, 109 y 127].

²⁵El tiempo Markoviano para el electrón es de $\sim 10^{-20}$ s.

de onda $\psi(\mathbf{x}, t)$ en el espacio de configuración. Para ello se puede utilizar la transformada de Fourier de la densidad

$$\tilde{Q}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, t) = \int Q(\mathbf{x}, \mathbf{p}, t) e^{i\mathbf{p}\cdot\mathbf{z}} dp,$$

tal que la densidad de probabilidad en el espacio de configuración es la densidad de probabilidad

$$\rho(\mathbf{x}, t) = \int Q(\mathbf{x}, \mathbf{p}, t) dp = \tilde{Q}(\mathbf{x}, 0, t)$$

y el promedio local de una función generica $g(\mathbf{x}, \mathbf{p}, t)$ es

$$\langle g \rangle(\mathbf{x}) \equiv \langle g \rangle_{\mathbf{x}} = \frac{1}{\rho} \int g(\mathbf{x}, \mathbf{p}, t) Q dp.$$

Posteriormente, la ecuación de movimiento de \tilde{Q} se reescribe varias veces hasta alcanzar una forma en la que los términos radiativos se desprecian que es la aproximación no radiativa, y se obtiene una ecuación tipo Schrödinger:

$$2i\eta \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{2\eta^2}{m} \nabla^2 \psi + V\psi$$

donde η es un parámetro que falta determinar, y ψ es la amplitud de la densidad de probabilidad. Por haberse tomado la aproximación no radiativa, el campo de vacío no está presente en la ecuación de movimiento tipo Schrödinger.

Finalmente, para obtener el valor de η se considera la densidad espectral de energía del campo de punto cero ρ_0 (ver apéndice B, ecuación B.1), lo cual permite incorporar la constante de Planck) y la condición de balance de energía (ver ecuación (4.2));²⁶ el campo se vuelve a hacer presente. Se obtiene el valor de $\eta = \hbar/2$, con lo que al sustituir en la ecuación tipo Schrödinger se obtiene la ecuación de Schrödinger:²⁷

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V\psi \quad (4.3)$$

²⁶La condición de balance de energía se satisface término a término, lo cual es denominado balance detallado de energía.[46, pp. 126-129].

²⁷Con EDE es posible deducir que el espín del electrón es una propiedad que emerge de la interacción de la interacción del electrón con el campo, por lo que a diferencia de la mecánica cuántica no se le considera una propiedad intrínseca. Con los resultados obtenidos EDE sobre el espín del electrón es posible pasar de la ecuación de Schrödinger a la ecuación de Pauli. Ver [46, capítulo 6].

Aquí se muestra que la EDE tiene el formalismo de la mecánica cuántica con la IE. Con esta forma de proceder, se llega a la ecuación de Schrödinger de manera realista por medio de la causalidad perdida.

La derivación de la regla de Born.

Los autores señalan que, durante el análisis que hacen para deducir la ecuación de Schrödinger, obtienen como un resultado importante la derivación de la regla de Born; a continuación se presenta dicha derivación.²⁸

Primero, al considerar el cambio de las variables \mathbf{x} y \mathbf{p} por las variables \mathbf{z}_+ y \mathbf{z}_- , relacionadas como sigue

$$\mathbf{z}_+ = \mathbf{x} + \eta\mathbf{z} \quad \text{y} \quad \mathbf{z}_- = \mathbf{x} - \eta\mathbf{z}$$

tal que η es el parámetro que resulta tener el valor de $\hbar/2$ a partir de la condición de energía de balance, se escribe \tilde{Q} como

$$\tilde{Q}(\mathbf{z}_+, \mathbf{z}_-, t) = q_+(\mathbf{z}_+, t)q_-(\mathbf{z}_-, t)\chi(\mathbf{z}_+, \mathbf{z}_-, t)$$

donde $\chi(\mathbf{z}_+, \mathbf{z}_-, t)$ es la parte no factorizable de $\tilde{Q}(\mathbf{z}_+, \mathbf{z}_-, t)$.

Después, al notar que $\tilde{Q}^*(\mathbf{x}, \mathbf{z}, t) = \tilde{Q}(\mathbf{x}, -\mathbf{z}, t)$ y en específico que

$$q_+(\mathbf{z}_\pm, t) = q_-^*(\mathbf{z}_\pm, t), \quad \chi^*(\mathbf{z}_+, \mathbf{z}_-, t) = \chi(\mathbf{z}_-, \mathbf{z}_+, t),$$

se reescribe \tilde{Q} como

$$\tilde{Q}(\mathbf{z}_+, \mathbf{z}_-, t) = q(\mathbf{z}_+, t)q^*(\mathbf{z}_-, t)\chi(\mathbf{z}_+, \mathbf{z}_-, t)$$

donde $q(\mathbf{z}_\pm, t) \equiv q_+(\mathbf{z}_\pm, t)$ y por ende $\tilde{Q}(q, \chi)$.

Por último, al usar que la densidad de probabilidad en el espacio de configuración es la densidad de probabilidad $\rho(\mathbf{x}, t) = \tilde{Q}(\mathbf{x}, 0, t)$ por lo que

$$\rho(\mathbf{x}, t) = q^*(\mathbf{x}, t)q(\mathbf{x}, t)\chi_0(\mathbf{x}, t)$$

donde $\chi_0(\mathbf{x}, t) = \chi(\mathbf{z}_+, \mathbf{z}_-, t)|_{\mathbf{z}_+ = \mathbf{z}_-}$ es una función real que puede ser una constante, se obtiene

$$\rho(\mathbf{x}, t) = q^*(\mathbf{x}, t)q(\mathbf{x}, t) \tag{4.4}$$

²⁸[46, p. 118].

si se considera que $\chi_0(\mathbf{x}, t) = 1$.

Por lo tanto, señalan los autores,²⁹ la regla de Born que en mecánica cuántica es un postulado en EDE es una consecuencia natural de la descripción estadística.

4.2.2. Sobre la deducción de la ecuación de Heisenberg.

El sistema de estudio de la EDE es una partícula de masa m y carga e inmersa en el campo de punto cero y sujeta a una fuerza externa $f(t)$;³⁰ y la ecuación de movimiento (no relativista y en la aproximación de onda larga) de dicha partícula es la ecuación de Abraham-Lorentz (ver ecuación 4.1). Únicamente se buscan los estados estacionarios de la ecuación de movimiento por lo que la fuerza externa es conservativa, y por simplicidad se considera sólo una dimensión. En general se tiene más de una solución estacionaria de (4.1), y como $f(t)$ es una fuerza conservativa, entonces cada solución estacionaria es asociada con una energía ε_α y por ende puede ser etiquetada con un índice α . Por lo tanto la ecuación de Abraham-Lorentz ahora se denota con tal índice:

$$m\ddot{x}_\alpha = f_\alpha(t) + m\tau\dot{\ddot{x}}_\alpha + eE_\alpha(t) \quad (4.5)$$

con

$$x_\alpha(t) = \sum_{\beta} \tilde{x}_{\alpha\beta} a_{\alpha\beta} e^{i\omega_{\alpha\beta}t},$$

$$f_\alpha(t) = \sum_{\beta} \tilde{f}_{\alpha\beta} a_{\alpha\beta} e^{i\omega_{\alpha\beta}t} \quad \text{y} \quad E_\alpha(t) = \sum_{\beta} \tilde{E}_{\alpha\beta} a_{\alpha\beta} e^{i\omega_{\alpha\beta}t}$$

donde $\omega_{\alpha,\beta}$ (con $\omega_{\alpha,\beta} \sim -\frac{\tilde{f}_{\alpha\beta}}{m\tilde{x}_{\alpha\beta}}$) son las frecuencias resonantes asociadas a los modos del campo que son relevantes para la solución estacionaria α en cuestión, y $a_{\alpha,\beta} = e^{i\varphi_{\alpha\beta}}$ (con $\varphi_{\alpha\beta} \in [0, 2\pi]$ una fase estocástica) son las variables estocásticas asociadas a las amplitudes estocásticas de los modos del campo.

El campo de vacío es estocástico, y cada realización específica para un tiempo dado es desconocida, por lo que se considera un ensemble del sistema compuesto (partícula y campo).³¹ Es decir, el conjunto i de todas las

²⁹[46, p. 143].

³⁰La información presentada en este apartado está basada en [46, capítulo 5].

³¹En lo que sigue de esta subsección no se presentaran las ecuaciones explícitamente, en general, sino que se hará un esbozo del camino hacia la ecuación de Heisenberg.

realizaciones del campo determina el ensemble de todas las posibles realizaciones de un sistema individual. Al considerar un estado α , para lo cual se considera que ya se ha alcanzado el régimen cuántico, se hace referencia a un subensemble de partículas que corresponden a un subensemble $\{i\}_\alpha$ de realizaciones del campo tal que $\{i\} = \bigcup \{i\}_\alpha$ y $x_\alpha(t)$ debe hacer referencia a la realización del campo que corresponde como $x_\alpha^{(i)}(t)$ con $(i) \in \{i\}_\alpha$.

Las soluciones estacionarias pueden ser descompuestas en contribuciones independientes del tiempo, tal que las variables dinámicas asociadas satisfacen el promedio temporal

$$\overline{g(i, t; \alpha)}^t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T g(i, t; \alpha) dt.$$

Y el promedio sobre las realizaciones del campo $\overline{(\cdot)}^{(i)}$ con $(i) \in \{i\}_\alpha$ es equivalente al promedio sobre el subensemble de partículas $\langle \cdot \rangle$ que han alcanzado el estado estacionario α .

Ahora, se impone la segunda hipótesis que lleva al régimen cuántico. El sistema en el estado estacionario ha adquirido propiedades ergódicas, lo cual significa se hace recurrente en términos estadísticos de tal manera que eventualmente llena la superficie espacial disponible. El principio ergódico implica que:

Los promedios temporales de las variables dinámicas coincidan con su correspondientes promedios sobre las realizaciones del campo o, equivalentemente, subensemble de partículas:

$$\overline{g(i, t; \alpha)}^t = \overline{g(i, t; \alpha)}^{(i)} = \langle g(i, t; \alpha) \rangle \quad (4.6)$$

Esto quiere decir que el promedio temporal de cada variable es independiente de la realización del campo.

A partir de este principio, se puede deducir que $x_\alpha(t)$, $f_\alpha(t)$ y $E_\alpha(t)$ son funciones lineales de las componentes estocásticas $a_{\alpha\beta}$ del campo. Por ello se le llama a la teoría electrodinámica estocástica lineal (EDEL), pero puede ser entendida como una forma desarrollada de EDE teniendo en cuenta que la teoría está en construcción.³²

³²El considerar que EDEL sea una versión desarrollada de EDE implica que no sea necesario el cambio de nombre en la teoría en este contexto, razón por la cual se le seguira

El principio de ergodicidad permite determinar que hay estados estacionarios adicionales del sistema con lo que se tienen nuevas frecuencias y nuevas variables estocásticas, en particular se obtiene que las variables estocásticas deben satisfacer

$$a_{\alpha\beta}^{(i)} = e^{i\varphi_{\alpha\beta}^{(i)}} = e^{i\phi_{\alpha}^{(i)}} e^{-i\phi_{\beta}^{(i)}},$$

las cuales portan un algebra matricial que heredan a las variables y a las ecuaciones. Por lo tanto

$$m \frac{d^2 \hat{x}(t)}{dt^2} = \hat{f}(t) + m\tau \frac{d^3 \hat{x}(t)}{dt^3} + e\hat{E}(t)$$

Cada variable dinámica puede ser expresada como una serie de potencias de la forma $h(x)+g(\dot{x})$ tal que tiene una matriz hermitiana cuadrada \hat{A} asociada, cuyos elementos se denotan como $A_{\alpha\beta}$, en donde el renglón α corresponde a la variable $A(t)$ en el estado α :

$$A_{\alpha}(t) = A_{\alpha\alpha} + \sum_{\beta \neq \alpha} A_{\alpha\beta} a_{\alpha\beta} e^{i\omega_{\alpha\beta} t}$$

tal que los elementos de la diagonal son los valores medios de la variable y los elementos fuera de la diagonal tienen información de las desviaciones de estos valores medios:³³ $A_{\alpha\alpha} = \overline{A_{\alpha}(t)}^t = \langle A_{\alpha} \rangle$ y $\sigma_{A_{\alpha}}^2 = \sum_{\beta \neq \alpha} |A_{\alpha\beta}|^2$, respectivamente, de donde se observa que debido al principio de ergodicidad las variables estocásticas son canceladas.

Considerando la aproximación no radiativa se deduce que el conmutador de los operadores asociados a las variables x y p depende del campo, lo cual permite determinar que las frecuencias de resonancia son las frecuencias de transición

$$\hbar\omega_{\alpha,\beta} = \varepsilon_{\alpha} - \varepsilon_{\beta},$$

llamando EDE. En los ochentas y noventas EDE no describía correctamente a los sistemas sujetos a fuerzas no lineales, por lo que añadir el principio de ergodicidad para que se resolviera tal problema fue tan importante que se reflejo denominando a la teoría EDEL en vez de EDE.[46, p. 178].

³³La desviación se define en términos del promedio temporal y del promedio del subensamble de las partículas:

$$\sigma_{A_{\alpha}}^2 = \overline{|A_{\alpha} - \overline{A_{\alpha}(t)}^t|^2} = \langle \alpha | \hat{A}^2 | \alpha \rangle - \langle \alpha | \hat{A} | \alpha \rangle^2.$$

esto es, las transiciones cuánticas ocurren cuando la partícula responde resonantemente al modo del campo de radiación. Y a su vez se obtiene la ecuación de Heisenberg para una variable $A(t) = A(x(t), p(t))$:

$$i\hbar \frac{d\hat{A}(t)}{dt} = [\hat{A}(t), \hat{H}] \quad (4.7)$$

En EDE -al igual que en la mecánica cuántica- se puede describir los vectores de estado del sistema cuántico por medio del espacio de Hilbert \mathcal{H} . En la representación de energía estocástica, el valor del operador \hat{A} cambia en el tiempo de la siguiente forma

$$\langle \alpha | \hat{A} | \beta \rangle_{(i)} \equiv \langle \alpha^{(i)}(t) | \hat{A}(0) | \beta^{(i)}(t) \rangle = \langle \alpha(0) | e^{i\phi_\alpha^{(i)}} e^{i\varepsilon_\alpha t/\hbar} \hat{A}(0) e^{-i\phi_\beta^{(i)}} e^{-i\varepsilon_\beta t/\hbar} | \beta(0) \rangle$$

donde a $|\alpha^{(i)}(t)\rangle$ y $\hat{A}(0)$ se le llamada descripción de Schrödinger estocástica, mientras a $|\alpha(0)\rangle$ y $\hat{A}^{(i)}(t)$ se le denominada descripción de Heisenberg estocástica. Tanto el vector de estado como el operador pueden contener la información de la evolución temporal y la estocasticidad del valor del operador en cuestión.

Si se quita la variable estocástica $a_{\alpha\beta}$, entonces se obtienen las descripciones de Schrödinger y Heisenberg que se usan en la mecánica cuántica con la IE. Por lo tanto a partir de EDE se llega al formalismo de la mecánica cuántica de una forma realista, pero se pierde la causalidad.

Estados entrelazados.

Una de las aplicaciones sobresalientes de EDE es el estudio de las partículas entrelazadas.³⁴ En mecánica cuántica las partículas entrelazadas se estudian como sistemas independientes, mientras en EDE dichas partículas constituyen un sistema compuesto inmerso en el campo de punto cero conformando al sistema completo.

A partir del formalismo de EDE se inicia con las ecuaciones de Abraham-Lorentz de las partículas, y se asume que las partículas estan sujetas a la misma realización del campo. Así que se excluyen los sistemas compuestos de partículas que son arbitrariamente distantes, ya que en esta situación el campo en la vecindad de cada partícula es estadísticamente independiente

³⁴En [46, capítulo 7] se presenta el estudio de EDE sobre los estados entrelazados de dos partículas en una dimensión.

del otro y puede ser considerado que corresponda a distintas realizaciones. Básicamente, por medio de la descripción de Heisenberg de EDE, las variables dinámicas de las partículas se correlacionan si las partículas resuenan a una misma (o varias) frecuencia(s) del campo de fondo. Por lo tanto, la EDE permiten estudiar los estados entrelazados de las partículas correlacionadas identificando al campo de punto cero como el elemento físico que los origina.

En el estudio de los estados entrelazados al pasar de la descripción de EDE a la dada por la mecánica cuántica desaparece el campo de fondo, por lo que se pierde la causalidad y la localidad; o visto al revés, con la descripción de EDE se recobra la causalidad y la localidad perdida.

4.2.3. Sobre el origen físico de las desigualdades de Heisenberg.

Dentro del contexto de la parte matricial de EDE, en el camino hacia la deducción de la regla de transición de Bohr, se obtiene que la causa física de los conmutadores son las fluctuaciones del campo de punto cero. A partir de considerar la aproximación no radiativa se obtiene que

$$[\hat{x}, \hat{p}] = C\mathbb{I}$$

donde $C = \text{constante}$. Luego, por simplicidad, se considera un ensemble de osciladores armónicos de frecuencia ω_0 incrustados en el campo de punto cero con lo que se deduce que C depende de las frecuencias del campo y la contribución dominante proviene de las frecuencias resonantes a las que responden las partículas, de tal forma que C es igual a $i\hbar$. Por lo tanto:

$$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar\mathbb{I} \quad (4.8)$$

Así que, la ecuación anterior es válida sólo cuando el regimen cuántico es alcanzado y refleja la respuesta resonante de la partícula a las fluctuaciones del campo de punto cero.³⁵

Una consecuencia inmediata de la deducción del valor del conmutador de \hat{x} y \hat{p} es la derivación de las desigualdades de Heisenberg de estos operadores, en consecuencia heredan el mismo origen físico. En mecánica cuántica

³⁵Para la deducción matemática completa del valor del conmutador de \hat{x} y \hat{p} ver [46, pp. 187-190].

sólo es posible derivar las desigualdades de Heisenberg sin llegar al valor del conmutador de \hat{x} y \hat{p}

$$\langle(\Delta\hat{x})^2(\Delta\hat{p})^2\rangle \geq \frac{1}{4}\langle\hat{C}\rangle^2 = \frac{1}{4}|\langle[\hat{x},\hat{p}]\rangle|^2,$$

por lo que es necesario postularlo para obtener la forma explícita de las desigualdades de Heisenberg. Mientras que en EDE no se postula el conmutador sino que se deriva, con lo cual se obtiene la forma explícita de las desigualdades de Heisenberg

$$\langle(\Delta\hat{x})^2(\Delta\hat{p})^2\rangle \geq \frac{1}{4}\hbar^2 \quad (4.9)$$

Por lo tanto, las desigualdades de Heisenberg únicamente son válidas en el régimen cuántico y son un efecto de la acción del campo de punto cero sobre la partícula.³⁶

En concreto cuando empieza a interactuar la partícula con el campo, se podría suponer que no hay dispersión en el tiempo $t = 0$. El valor del conmutador como la derivación de las desigualdades de Heisenberg son resultados ocurren al considerar la aproximación radiativa y el principio de ergodicidad al tiempo $t = t_M$.

Los autores establecen que la violación del valor del conmutador (y por ende las desigualdades de Heisenberg) podrían demostrar la verificación de EDE, y en caso contrario su refutación.³⁷

Las trayectorias cuánticas.

En la IO se considera que las desigualdades de Heisenberg establecen que las partículas no pueden tener posición y momento definido, en consecuencia con esta interpretación se niega la existencia de las trayectorias de las partículas cuánticas. En la IE las desigualdades de Heisenberg indican un límite al producto de las dispersiones de dos variables, por tanto no niegan la existencia de las trayectorias cuánticas.

La EDE es consistente con la IE de la mecánica cuántica, y encuentra que el origen físico de las desigualdades de Heisenberg es debido al campo de fondo. En EDE la ecuación (4.1) codifica la trayectoria de la partícula que

³⁶Ver [46, pp. 183, 190 y 194].

³⁷Ver [46, p. 190].

describe, cuya resolución se puede hacer con cálculos numéricos. [49, 50]³⁸ En palabras de los autores: "Nuestro corolario es por lo tanto que la mecánica cuántica es incapaz de explicitar lo aludido a la noción de trayectoria, sin que esto sin embargo implique una negación de la noción de trayectoria."³⁹

4.2.4. Resumen y conclusiones.

En EDE se plantea el *gedankenexperiment* de una partícula y el campo de vacío clásicos que comienzan a interactuar al tiempo $t = 0$ cuyo comportamiento es descrito por una ecuación de movimiento estocástica clásica; el planteamiento es realista al no incorporar al observador, causal teniendo como elemento principal al campo de vacío, determinista y local en virtud de la ecuación inicial. Y se siguen dos rutas diferentes:

Ruta 1.

Como no se puede determinar la realización específica del campo a un tiempo dado, entonces la ecuación estocástica es reemplazada por la ecuación del ensemble del sistema completo; en el desarrollo se pierde parte de la causalidad proporcionada por el vacío, pero el realismo se mantiene por medio de la interpretación de ensemble, y al obtener una ecuación estadística se tiene un determinismo no local característico de las teorías estadísticas. Al evolucionar el sistema completo hacia el equilibrio en un tiempo $t = t_M$ cuando se tiene la situación de balance de energía-, los términos radiativos en las ecuaciones dinámicas que describen al sistema se convierten en meras correcciones que pueden ser olvidadas en una primera aproximación y en consecuencia puede ser descrito por las ecuaciones cuánticas.

Los autores enfatizan que no es una teoría semiclassical, pues tanto la materia como el campo inician siendo clásicos y posteriormente terminan siendo cuantizados, y que en el intervalo de tiempo $0 < t < t_M$ el sistema no tiene un comportamiento clásico (pues interviene la \hbar por medio del campo) ni cuántico (porque todavía no se ha alcanzado el régimen cuántico) quedando éste aún desconocido.⁴⁰

Ruta 2.

³⁸Con métodos numéricos se estudia en [49]el campo de punto cero, y en [50] las trayectorias de las partículas considerando el campo de punto cero.

³⁹[46, p. 301]

⁴⁰Ver [46, pp. 22, 23, y 143].

Esta vez las soluciones de interés de la ecuación estocástica son las estacionarias, y como el campo es estocástico se considera un ensemble del sistema; otra vez se pierde parte de la causalidad dada por el campo, pero el realismo se mantiene a través del ensemble, y se tiene una descripción determinismo no local al hacer un análisis estadístico. Se considera que el promedio de las variables no dependen de la realización del campo -la llamada demanda de ergodicidad - y se obtiene una ecuación matricial tal que contiene la información del ensemble del sistema. También se considera la aproximación no radiativa en $t = t_M$ de tal forma que se llega a la descripción de la mecánica cuántica; con esta ruta se obtiene la ecuación de Heisenberg.

Los autores resaltan⁴¹ que a partir de ésta descripción se revela la respuesta lineal y resonante de la partícula a ciertos modos del campo que queda oculta en la descripción de Schrödinger, pero que determinar cuál transición se lleva a cabo depende de las condiciones específicas del sistema por lo que no es inferido de la descripción estadística actual.

Las rutas 1 y 2 conducen a la descripción de Schrödinger y a la descripción de Heisenberg respectivamente, brindando información distinta en cada caso tal que las descripciones son complementarias a diferencia de la mecánica cuántica donde se consideran sólo como formalismos equivalentes.

El formalismo de la mecánica cuántica coexiste con diferentes interpretaciones filosóficas, que pueden ser objetivas o subjetivas como la IE o la IO, respectivamente, que se estudian en el *capítulo tres*; en cambio, en EDE se adopta la IE y a través de nueva física proporcionada por el campo de punto cero se vuelve la interpretación causal lo que permite comprender mejor el fenómeno cuántico. Por lo tanto la mecánica cuántica sólo es predictiva, y si se considera una interpretación objetiva entonces encaja con la UA de Lakatos, mientras la EDE es predictiva, objetiva y explicativa por lo que concuerda con la UA de Laudan.

La causalidad dada por el campo de punto cero, y el determinismo y la localidad que suministran las ecuaciones, son características de la EDE en marcada diferencia con la mecánica cuántica que es acausal pues no hace referencia a ningún agente causal, e indeterminista y no local por las ecuaciones que proporciona; todos estos términos son parte de los elementos fundamentales que cimientan las construcciones teóricas, como se resalta en el *capítulo*

⁴¹Ver [46, pp. 192 y 198].

dos. Así que, el estudio de EDE es interesante/innovador porque los elementos que fundamentan su construcción recuperan la física que no se tiene al pasar al régimen cuántico.

En el *capítulo uno* se explica que para la construcción de cualquier teoría física se requieren compromisos ontológicos, supuestos básicos y compromisos metodológicos; se exponen explícitamente estos elementos al estudiar EDE desde la perspectiva de una construcción teórica con lo cual se deja el nivel abstracto. En consecuencia, por medio de EDE se observa con detalle que el fenómeno cuántico no es intrínseco a los sistemas sino que emerge de la interacción de la materia con el campo de punto cero.

El sendero que se traza en este trabajo permite elucidar el sentido en que la física incorpora a la filosofía, a través de conocer que una nueva teoría requiere de adoptar una postura filosófica no en función de preferencias personales sino de avanzar en la comprensión de la naturaleza. Ello se obtuvo a partir de un análisis filosófico de las teorías físicas, en concreto del contenido de mecánica cuántica y de los elementos de construcción de EDE. En conclusión la filosofía es necesaria no sólo para comprender las teorías físicas sino para construir nuevas teorías.

Apéndice A

Cuerpo negro.

Un cuerpo negro es aquel que absorbe toda la radiación electromagnética que incide sobre su superficie, y además radia; se puede construir con una pieza metálica hueca con cierta temperatura fija T y un pequeño orificio, el interior de la cavidad se comporta como un cuerpo negro y la radiación que escapa por el orificio es como la radiación del cuerpo negro.¹

Siguiendo la termodinámica clásica se tiene que la densidad espectral de la radiación de un cuerpo negro es independiente de la naturaleza de las paredes, así que Planck propuso modelarlas como un conjunto de osciladores en interacción sólo con la radiación. Cada oscilador radia al vibrar, por lo que sobre él actúa una fuerza de radiación llamada *reacción de radiación*; al considerarla la fuerza de radiación, se obtiene la siguiente ecuación de movimiento para un oscilador

$$\ddot{x} + \omega^2 x - \frac{2e^2}{3mc^3} \ddot{x} = \frac{e}{m} \mathcal{E}_x,$$

donde \mathcal{E}_x es la componente x del campo de radiación en la cavidad, que se considera sólo depende del tiempo porque la longitud de onda de la radiación es $10^2 - 10^3$ veces mayor que el radio atómico; esta suposición se denomina la *aproximación de onda larga*.

Al resolver la ecuación por el método de transformadas de Fourier se obtiene

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{x}(\omega') e^{i\omega' t} d\omega', \quad \tilde{x} = \frac{e}{m} \frac{\tilde{\mathcal{E}}_x(\omega')}{\omega^2 - \omega'^2 + i2e^2\omega'^3/3mc^3}.$$

¹La siguiente presentación sobre la densidad espectral del cuerpo negro es parte del análisis que se encuentra en [30, pp. 16-19].

Entonces, la energía del oscilador promediada sobre un periodo es

$$\overline{E}^t = m \overline{\dot{x}^2(t)} \simeq \frac{3\pi c^3}{4\omega^2} |\tilde{\mathcal{E}}_x(\omega')|^2$$

Mientras que, la densidad media de la energía electromagnética en la cavidad es

$$u = \frac{3}{4\pi} \int_0^\infty |\tilde{\mathcal{E}}_x(\omega')|^2 d\omega = \int_0^\infty \rho(\omega) d\omega$$

de lo que se deduce que la densidad espectral de equilibrio a temperatura T es

$$\rho(\omega) = \frac{3}{4\pi} |\tilde{\mathcal{E}}_x(\omega')|^2 \quad \rightarrow \quad |\tilde{\mathcal{E}}_x(\omega')|^2 = \frac{4\pi}{3} \rho(\omega)$$

Por lo tanto, la energía media de un oscilador de frecuencia ω queda en términos de la densidad espectral en equilibrio a temperatura T :

$$\overline{E}^t = \frac{\pi^2 c^3}{\omega^2} \rho(\omega, T). \quad (\text{A.1})$$

A.1. Distribución de Rayleigh-Jeans.

De la mecánica estadística clásica, se tiene que el número medio de microsistemas con energía E de un macrosistema en equilibrio termodinámico a temperatura T es representado por la distribución de Maxwell-Boltzmann

$$N(E) = N_0 e^{-\beta E}, \quad \beta = \frac{1}{kT}$$

donde k es la constante de Boltzmann. A partir de esta distribución se obtiene la energía media de las partículas

$$\overline{E} = \frac{\int_0^\infty E e^{-\beta E} dE}{\int_0^\infty e^{-\beta E} dE} = \frac{1}{\beta}$$

que es el teorema de equipartición de la energía, todos los osciladores deben tener la misma energía media en equilibrio sin importar su frecuencia

$$\overline{E} = kT \quad (\text{A.2})$$

En un sistema consistente de un gran número de partículas independientes se puede esperar que se cumpla el *principio ergódico*: una vez que se ha

establecido el equilibrio termodinámico, la energía media por partícula que se obtiene al promediar sobre un gran número de ellas es igual al promedio temporal de la energía de una cualquiera de ellas

$$\overline{E} = \overline{E}^t$$

Finalmente considerando el principio ergódico, se igualan (A.1) y (A.2) con lo que la densidad espectral adquiere la distribución de Rayleigh-Jeans

$$\rho(\omega, T) = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} kT \quad (\text{A.3})$$

que coincide con los datos experimentales sólo para frecuencias pequeñas, por lo que es llamada catástrofe ultravioleta por Ehrenfest.

A.2. Distribución de Planck.

Si se considera el postulado de Planck, sobre que los osciladores y el campo de radiación en equilibrio sólo pueden intercambiar una energía que sea múltiplo entero de un cierto valor mínimo que puede depender de la frecuencia

$$E = nE_{min}, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

donde a E_{min} llamó cuanto de energía, y se repite el calculo para la energía media de las partículas se obtiene

$$\overline{E} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} nE_{min}e^{-\beta E} dE}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-\beta E} dE} = \frac{E_{min}}{e^{\beta E_{min}} - 1}. \quad (\text{A.4})$$

Al considerar de nueva cuenta el principio ergódico, e igualar (A.4) con (A.1) queda la densidad espectral en términos de E_{min}

$$\rho(\omega, T) = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \frac{E_{min}}{e^{\beta E_{min}} - 1}$$

Y siguiendo la ley de Wien de la termodinámica clásica

$$\rho(\omega, T) = \omega^3 f(\omega, T),$$

en donde f no puede ser determinada con argumentos clásicos, se deduce que el cuanto de energía adquiere la forma

$$E_{min} = \hbar\omega$$

donde \hbar es una constante con dimensiones de acción. Así que finalmente, la densidad espectral toma la forma de la distribución de Planck

$$\rho(\omega, T) = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{1}{e^{\hbar\omega/kT} - 1} \quad (\text{A.5})$$

que coincide con los datos experimentales para todas las frecuencias, y satisface la ley de Stefan-Boltzmann

$$u(T) = \int_0^\infty \rho(\omega, T) d\omega = aT^4, \quad a = \frac{\pi^2 k^4}{15c^3 \hbar^3}$$

Una vez conocido el valor empírico de a es posible determinar la constante de Planck

$$\hbar = 1,05 \times 10^{-27} \text{erg} \cdot \text{seg}.$$

Apéndice B

Cuerpo negro y campo de punto cero.

A continuación se estudia el cuerpo negro, que es un sistema compuesto por el campo de radiación electromagnética en equilibrio con la materia a temperatura T (ver apéndice A), considerando el campo de punto cero.¹

La parte material del cuerpo negro se puede modelar con osciladores armónicos y un modo de frecuencia ω monocromático del campo de radiación es equivalente a un oscilador armónico de esa misma frecuencia, por lo que se usan los resultados termodinámicos del oscilador armónico. La energía libre de Helmholtz es

$$F(t, \omega) = -k_B T \phi(\omega, t),$$

donde k_B es la constante de Boltzmann y ϕ es el potencial termodinámico, tal que la energía media de equilibrio es

$$U(T, \omega) = -k_B \omega \frac{d\phi(z)}{dz},$$

con $z = \omega T$, que al compararla con la ley de Wien $U = \omega f(\omega, t)$ y considerar el límite $T \rightarrow \infty$ se obtiene

$$\varepsilon_0 \equiv U(0, \omega) = \omega f(\infty) = -k_B \omega \frac{d\phi(z)}{dz}(\infty) = A\omega.$$

¹Los resultados que a continuación se presentan sobre la energía media del cuerpo negro son parte del análisis que se encuentra en [46, capítulo 3].

A ε_0 , la energía media del oscilador a la temperatura $T = 0$, se le llama la energía de punto cero pues corresponde al campo de punto cero. Usualmente en termodinámica se considera que $A = 0$, pero puede considerarse otro valor como $A = \hbar/2$ con la intención de hacer contacto con la descripción del cuerpo negro y por ende

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega \quad \rightarrow \quad \rho_0 = \frac{\hbar\omega^3}{2\pi^2c^3} \quad (\text{B.1})$$

B.1. Energía de Planck.

De la termoestadística, se tiene que la distribución estadística de la energía es

$$W_s(\varepsilon) = \frac{1}{U}e^{-\varepsilon/U},$$

que incluye la energía de punto cero a diferencia de la distribución de Boltzmann (continua/discreta), con

$$\int W_s(\varepsilon)d\varepsilon = 1, \quad \int \varepsilon W_s(\varepsilon)d\varepsilon = U.$$

La dispersión de la energía considerando esta distribución es

$$(\sigma_\varepsilon^2)_s = U^2,$$

y a temperatura cero se tiene

$$(\sigma_\varepsilon^2)_s|_0 = U^2(T = 0) = \varepsilon_0^2$$

en contraste no hay fluctuaciones no termicas considerando la distribución de Boltzmann. Así que, la relación entre las fluctuaciones termicas y no termicas de la energía es

$$(\sigma_\varepsilon^2)_T = (\sigma_\varepsilon^2)_s - \varepsilon_0^2 = U^2 - \varepsilon_0^2$$

y considerando $(\sigma_\varepsilon^2)_s = -\frac{dU}{d\beta}$, se obtiene

$$\frac{dU}{d\beta} = \varepsilon_0^2 - U^2.$$

Al integrar la relación anterior, con la condición $U(T \rightarrow \infty) \rightarrow \infty$, queda

$$U(\beta) = \begin{cases} \beta^{-1}, & \text{si } \varepsilon_0 = 0, \\ \varepsilon_0 \coth \varepsilon_0 \beta & \text{si } \varepsilon_0 \neq 0. \end{cases}$$

Se observa que para $\varepsilon_0 = 0$ se tiene justamente la energía de equipartición clásica

$$U_{cl} = \beta^{-1} = k_B T,$$

en tanto que para $\varepsilon_0 \neq 0$ y considerando (B.1) se obtiene la ley de Planck:

$$U_{Planck}(\omega, T) = \frac{1}{2} \hbar \omega \coth \frac{1}{2} \hbar \omega \beta, \quad (B.2)$$

notese que no fue necesario demandar ninguna suposición de discretitud y que incluye la energía de punto cero puesto que

$$U_{Planck}(\omega, T \rightarrow 0) = \frac{1}{2} \hbar \omega = \varepsilon_0.$$

Por lo tanto, la energía promedio (B.2) puede ser separada en su parte termica y su parte no termica

$$U_{Planck} = U_T + \varepsilon_0.$$

Entonces

$$U_T = U_{Planck} - \varepsilon_0 = \varepsilon_0 \coth \varepsilon_0 \beta - \varepsilon_0 = \frac{2\varepsilon_0}{e^{2\varepsilon_0 \beta} - 1}, \quad (B.3)$$

que es la ley de Planck sin la energía de punto cero.

Bibliografía

- [1] Comte, A. (2003). *La filosofía positiva*. (ed. 9) México: Editorial Porrúa. (con notas de Francisco Larroyo).
- [2] Olivé, L. y Pérez Ransanz, A. R. (comps.) (1993). *Filosofía de la ciencia: teoría y observación*. México: Siglo XXI y UNAM (con notas de los compiladores).
- [3] <http://plato.stanford.edu/entries/russell/>
- [4] <http://plato.stanford.edu/entries/wittgenstein/>
- [5] <http://plato.stanford.edu/entries/vienna-circle/>
- [6] <http://plato.stanford.edu/entries/popper/>
- [7] <http://plato.stanford.edu/entries/logical-empiricism/>
- [8] Pérez Ransanz, A. R. (1993). *Modelos de cambio científico*. En Moulines, C. U. (Ed.) *La ciencia: estructura y desarrollo*. (pp. 181-202). Madrid: Trotta.
- [9] Kuhn, T. S. (2004). *La estructura de las revoluciones científicas*. (ed. 2) México: Fondo de cultura económica.
- [10] Kuhn, T. S. (1982). *La tensión esencial: estudios selectos sobre la tradición y el cambio en el ámbito de la ciencia*. México: Fondo de cultura económica.
- [11] <http://plato.stanford.edu/entries/incommensurability/#ComKuhFeyInc>

- [12] Lakatos, I. (1982). *La metodología de los programas de investigación científica*. Madrid: Alianza Editorial.
- [13] Lakatos, I. (1978). *Pruebas y refutaciones. La lógica del descubrimiento matemático* Madrid: Alianza Editorial.
- [14] Laudan, L. (1977). *Progress and Its Problems. Toward a Theory of Scientific Growth*. Berkeley: University of California Press.
- [15] Marquina, J. E. (2006). *La tradición de investigación newtoniana*. México: UAM.
- [16] Laudan, L. (1984). *Science and Values. The Aims of Science and Their Role in Scientific Debate*. Berkeley: University of California Press.
- [17] Bunge, M. (1978). *Filosofía de la física*. México: Ariel.
- [18] Brody, T. (1993). *The Philosophy Behind Physics*. New York: Springer-Verlag.
- [19] de la Peña, L. y Cetto, A. M. (1996). *The Quantum Dice. An Introduction to Stochastic Electrodynamics*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- [20] <http://plato.stanford.edu/entries/scientific-realism/>
- [21] Diéguez, A. J. (1998). *Realismo científico. Una introducción al debate actual en filosofía de la ciencia*. Barcelona: Universidad de Málaga.
- [22] Hacking, I. (1983). *Representing and Intervening*. New York: Cambridge University Press.
- [23] Bakker, G. y Clark L. (1994). *La explicación. Una introducción a la filosofía de la ciencia*. México: Fondo de cultura económica.
- [24] de Gortari, E. (1986). *Dialéctica de la física*. México: Ediciones Océano.
- [25] Jammer, M. (1954). *Concepts of Space. The History of Theories of Space in Physics*. Cambridge: Harvard University Press.
- [26] Einstein, A., Podolsky, B. y Rosen, N. (1935). *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?* en *Physical Review*, Vol. 47, pp. 777-780.

- [27] Jammer, M. (1974). *The Philosophy of Quantum Mechanics. The interpretation of Quantum Mechanics in Historical Perspective*. New York: Wiley.
- [28] Auletta, G. (2001). *Foundations and Interpretation of Quantum Mechanics*. New Jersey: World Scientific.
- [29] Home, D. (1997). *Conceptual Foundations of Quantum Physics. An Overview from Modern Perspectives*. New York: Plenum Press.
- [30] de la Peña, L. (2006). *Introducción a la mecánica cuántica*. (ed. 3) México: FCE, UNAM.
- [31] Ballentine, L. (1998). *Quantum Mechanics. A Modern Development*. New Jersey: World Scientific.
- [32] Messiah, A. (1958). *Quantum Mechanics*. New York: John Wiley.
- [33] Cohen, C., Diu, B., Laloë, F. (1977). *Quantum Mechanics. Volume I*. New York: John Wiley.
- [34] Feynman, R. P., Hibbs, A. R. (1964). *Quantum Mechanics and Path Integrals*. New York: McGraw-Hill.
- [35] Hirshfeld, A. C., Henselder, P. *Deformation Quantization in the Teaching of Quantum Mechanics*.
- [36] Notas del curso *Introducción a la teoría cuántica de campos*, <http://www.nucleares.unam.mx/~alberto/apuntes/indice.html>
- [37] Weinberg, S. (2005). *The Quantum Theory of Fields, Vol. I*. New York: Cambridge University Press.
- [38] Peskin, M. E., Schroeder, D. V. (1995). *An Introduction to Quantum Field Theory*. Addison-Wesley.
- [39] Aharony, O., Gubser, S.S., Maldacena, J.M., Ooguri, H. y Oz, Y. (2000). *Large N field theories, string theory and gravity*. en Phys. Rept. [arXiv:hep-th/9905111].
- [40] Álvarez, M. A. (2013). *Viscosidad y entropía de un plasma desde la física de hoyos negros*. (Tesis de licenciatura, UNAM).

- [41] Santos, E. (2014). *Towards a realistic interpretation of quantum mechanics providing a model of the physical world*. [arXiv:1203.5688v2].
- [42] Herzenberg, C. L. *Grete Hermann: An early contributor to quantum theory*.
- [43] Bell, J. S. (1990). *Lo decible e indecible en mecánica cuántica*. Madrid: Alianza.
- [44] de la Peña, L. y Cetto, A. M. (1974). *Stochastic Theory for Classical and Quantum Mechanical Systems*. en Foundations of Physics.
- [45] de la Peña, L. y Cetto, A. M. (1991). *Teorías estocásticas de la mecánica cuántica*. en RMF 37, pp. 17-55.
- [46] de la Peña, L., Cetto, A. M. y Valdés, A. (2014). *The Emerging Quantum. The physics behind quantum mechanics*. Springer.
- [47] Cetto, A. M., de la Paz, M. y Valdés, A. (comps.) (2006). *Navegante sin fronteras. Homenaje a Luis de la Peña*. México.
- [48] Cetto, A. M., de la Peña, L. y Valdés, A. (2014). *Specificity of the Schrödinger equation*.
- [49] Avendaño, J. y de la Peña, L. (2005). *Reordering of the ridge patterns of a stochastic electromagnetic field by diffraction due to an ideal slit*. en Phys. Rev. E 72.
- [50] Avendaño, J. y de la Peña, L. (2010). *Matter diffraction through a doublet slit obtained by numerical simulation using a diffracted random electromagnetic field*. en Physica E 42, pp. 313-316.