

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FILOSÓFICAS
Y FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS**

**"APROXIMACIÓN A LAS CONSECUENCIAS FILOSÓFICAS
DE LA ELECTRODINÁMICA ESTOCÁSTICA LINEAL:
REALISMO Y CAUSALIDAD EN LA MECÁNICA CUÁNTICA"**



T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN FILOSOFÍA DE LA CIENCIA

P R E S E N T A:

FERNANDA SAMANIEGO BAÑUELOS

ASESOR: LUIS DE LA PEÑA AUERBACH

2 0 0 6



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme becado a través de la Dirección General de Estudios de Posgrado(DGEP), por las oportunidades, las actividades y los espacios que ofrece. Es para mí un honor haberme formado en las aulas de la Facultad de Ciencias y del Instituto de Investigaciones Filosóficas. Gracias también al Consejo Nacional para la Ciencia y la Tecnología CONACYT, por el apoyo económico que me brindó durante mis estudios de maestría (2004-2006), haciendo posible la elaboración de este trabajo.

Estoy muy agradecida con mis padres y mi hermana. Por las escuelas que eligieron para mí, por su amor, por la vida. Con Manola en particular estoy agradecida por la forma sutil en que siempre me demuestra su respaldo y su amor incondicional. Con la Dra. Hilda Díaz estoy agradecida por todo lo que entendí a su lado.

Al Dr. Luis de la Peña le agradezco su constancia, su compromiso, su paciencia y la oportunidad de ser dirigida por alguien a quien admiro tanto. A la Dra. Ana Rosa Pérez Ransanz su cariñosa asesoría durante toda la maestría y su apoyo en todos los sentidos. A la Dra. Olimpia Lombardi su dedicación y las múltiples aportaciones que hizo a este trabajo a pesar de la distancia. Al Dr. Xavier de Donato sus comentarios en el Segundo Coloquio de Estudiantes, que enriquecieron mi trabajo gracias a las múltiples lecturas que realizó para preparar su réplica a mi ponencia. Al Dr. Eduardo González de Luna la cuidadosa lectura de mi tesis y sobretodo su guía puntual en el planteamiento del problema del realismo.

Al Dr. Pepe Marquina le agradezco que haya despertado con sus clases mi interés por estudiar filosofía de la ciencia. A mis profesores de la maestría en general por una formación que me deja más que satisfecha, en particular al Dr. Shahen Hacyan por sus comentarios y recomendaciones que fueron de gran ayuda para este trabajo.

A mis compañeros por ser un grupo solidario que me dio su confianza y en el que estuve muy contenta. En especial a José Ricardo, Marco, Carla, Jethro, Rodrigo y Fabrizio. A la Dra. Atocha, a Sylvia y a Noemí por el apoyo que me dieron a lo largo de toda la maestría.

A Nat por ser siempre mi hermana, ayudarme y acompañarme en esta etapa de la vida como lo ha hecho en todas desde que la conozco. A José Luis por sus sorpresas desmesuradas, su compañía y su protección. A mis amigos reencontrados Nuri, María y Abraham y a las nuevas Mabel y hermanas.

A mis compañeros y profesores de la licenciatura, que están en Ensenada y Tijuana con gran parte de mi corazón.

A la física, a la música, al mar.

Muchas gracias. Fernanda Samaniego

"Como ayer, hoy también existe un grupo de pensadores que, sin abandonar el escepticismo como norma para juzgar la realidad, confían en lo que ven; pretenden trascender los acertijos y ofrecer claridad entre las sombras de las ideas deformadas. No son desde luego, redentores de la humanidad, sino simplemente gente que navega creyendo que su labor puede ser importante para los demás".

François Jacob, citado por Carlos Chimal en *Conversaciones de Ciencia y Literatura*, 2001.

ÍNDICE

	Agradecimientos.....	vi
	Resumen.....	x
	Lista de abreviaturas y siglas.....	xi
	Capítulo 1: A MANERA DE INTRODUCCIÓN: EL PROBLEMA DE LA ESTABILIDAD ATÓMICA	1
	1.1 El modelo atómico de Bohr.....	1
	1.2 Desarrollos posteriores.....	3
	1.3 Solución propuesta por la Electrodinámica Estocástica Lineal.....	5
	1.4 Antecedentes	7
	1.5 Objetivo y Justificación de la tesis.....	8
	Capítulo 2: PROBLEMAS CONCEPTUALES DE LA MECÁNICA CUÁNTICA.....	9
	2.1 Indeterminismo y causalidad.....	9
	2.1.1 Esquema.....	13
	2.2 Medición o colapso.....	14
	2.2.1 Ejemplo del espín.....	15
	2.2.2 Colapso.....	16
	2.2.3 Modificaciones al formalismo cuántico.....	18
	2.2.4 Decoherencia.....	19
	2.3 El papel del observador.....	20
	2.4 No localidad.....	22
	2.4.1 Colapso retardado.....	25
	2.4.2 Resultados negativos.....	26
	2.5 Realismo	27
	
	2.5.1 Argumento EPR.....	28

	2.5.2 Teorema de Von Neumann y de Bell.....	29
	2.6 Respuestas propuestas por la interpretación ortodoxa y la interpretación realista.....	32
	2.6.1 Un pequeñísimo suelo común.....	32
	2.6.2 Interpretación ortodoxa.....	33
	2.6.3 Interpretación realista.....	37
	2.6.4 Matizando.....	41
	Capítulo 3: ELECTRODINÁMICA ESTOCÁSTICA LINEAL.....	44
	3.1 Bases y Antecedentes.....	44
	3.1.1 ¿Qué es un proceso estocástico?	44
	3.1.2 ¿Cómo surge la EDEL?	44
	3.1.3 Antecedentes.....	46
	3.1.4 Otras teorías estocásticas.....	46
	3.2 Propuesta actual: Electrodinámica Estocástica Lineal	48
	3.2.1 ¿La EDEL es clásica o cuántica?	49
	3.3 Respuestas de la EDEL a los problemas de la descripción cuántica.....	50
	3.3.1 Cuantización.....	50
	3.3.2 Indeterminismo y causalidad.....	51
	¿Qué dice la EDEL respecto a las trayectorias?	51
	De las trayectorias al problema de la causalidad y el indeterminismo.....	52
	3.3.3 Medición o colapso.....	53
	3.3.4 El papel del observador.....	54
	El experimento de la doble ranura.....	55
	3.3.5 Dualidad Onda Partícula.....	56
	3.3.6 No localidad.....	57
	Desigualdades de Bell, localidad y realismo.....	58
	No localidad en el formalismo cuántico.....	58
	3.3.7 Realismo.....	59
	3.4 Críticas a la EDEL y respuestas.....	60



Capítulo 4:	
¿QUÉ TAN RAZONABLE ES LA DEFENSA DE LA EDEL?	64



4.1 Criterios de Racionalidad	65
Generales	



4.2 Lombardi:	
Racionalidad y Ontología en la Mecánica Cuántica	69

4.2.1 Rompimiento de los lazos entre lenguaje, pensamiento y realidad	69
4.2.2 Heisenberg, Teorema Kochen-Specker y contextos	70
4.2.3 Principios de identidad	72
4.2.4 Preguntas ontológicas	73
4.2.5 Dos ontologías alternativas	74
4.2.6 ¿Desafía la mecánica cuántica a la racionalidad?	75
4.2.7 Salida de la EDEL	75
4.2.8 Comentario sobre la matriz de densidad	78



4.3 ¿Qué tan razonable es la defensa de la EDEL?	79
---	-----------



CONCLUSIONES	80
---------------------	-----------



Bibliografía	84
---------------------	-----------

	Apéndice 1: Cálculo de las órbitas estables para el H..	87
	Apéndice 2: La decoherencia y la matriz de densidad...	89
	Apéndice 3: Biografía de Niels Henrik David Bohr.....	91
	Apéndice 4: Ejemplo de la barrera y el pozo de potencial(controversia Einstein).....	Born- 93
	Apéndice 5: Soporte empírico de la EDEL: el efecto Casimir.....	96
	..	
	Apéndice 6: Ecuación de Schrödinger y de difusión.....	10 0



RESUMEN

Este trabajo es una aproximación a las consecuencias filosóficas de la **Electrodinámica Estocástica Lineal** (EDEL), teoría física que analiza a la mecánica cuántica desde un punto de vista externo, realista y causal, oponiéndose a las interpretaciones de la mecánica cuántica más aceptadas actualmente.

A manera de introducción (capítulo primero) se presenta la salida que propone la EDEL para un problema fundamental en la historia de la mecánica cuántica: el problema de la estabilidad atómica. Esto permite ejemplificar cómo la EDEL ofrece explicaciones basadas en la hipótesis de que existe un campo de radiación de fondo presente en todo el espacio, que interactúa con las partículas subatómicas y causa los fenómenos cuánticos.

Una vez que se ha introducido de manera muy general la propuesta física de la EDEL se plantean algunos problemas conceptuales de la mecánica cuántica (capítulo segundo). Como la relevancia de cada problema conceptual cambia de una interpretación de la mecánica cuántica a otra y podría argumentarse que la elección misma de los problemas a tratar tiene ya cierta carga ideológica. Atendiendo a esa dificultad, se intentó incluir en este trabajo una agenda de problemas que han sido centrales para distintas interpretaciones de la mecánica cuántica y se puso especial cuidado en que el planteamiento fuera lo más neutral posible.

A fin de ubicar a la EDEL entre otras interpretaciones de la mecánica cuántica se exponen (al final del segundo capítulo, sección 2.6) las ideas más importantes de la interpretación ortodoxa y de la interpretación realista einsteniana, enfatizando su postura ante los problemas conceptuales planteados y, más adelante (capítulo tercero), se explica cuáles son las respuestas de la EDEL ante tales problemas.

Finalmente (capítulo cuarto), se hace una reflexión epistemológica planteando la siguiente pregunta: ¿qué tan razonable es la defensa de la EDEL frente a otras interpretaciones de la mecánica cuántica? Para responder primero se toman en cuenta varios criterios clásicos de racionalidad científica. Posteriormente se analiza el problema planteado por la Dra. Olimpia Lombardi en su artículo "Mecánica cuántica: ontología, lenguaje y racionalidad" y se elabora una posible salida, alternativa a la de Lombardi, desde el punto de vista de la EDEL.



LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

Siglas frecuentes:

EDE .- Electrodinámica Estocástica

EDEL.- Electrodinámica Estocástica Lineal

Se utilizan en una sola ocasión:

LC .- Lógica Clásica

FMC .- Formalismo de la Mecánica Cuántica

REA .- Realismo mínimo

COM .- Teoría completa

SEP .- Sistemas Separables

P1 .- Principio uno

P2 .- Principio dos

P3 .- Principio tres



Capítulo 1. A MANERA DE INTRODUCCIÓN: EL PROBLEMA DE LA ESTABILIDAD ATÓMICA



1.1 EL MODELO ATÓMICO DE BOHR

En 1913, poco después de trasladarse a Manchester por invitación de Ernest Rutherford, Bohr publicó su artículo "*Sobre la constitución de los átomos y las moléculas*".

Para entonces, Nagaoka y Rutherford ya habían propuesto que el átomo estaba formado por un núcleo de carga positiva y electrones de menor masa y carga negativa que giraban en torno a él, pero ese modelo entraba en conflicto con la física clásica: los resultados del electromagnetismo muestran que una partícula cargada moviéndose de manera acelerada debe emitir radiación electromagnética de forma continua y esto implicaba que el electrón en su viaje alrededor del núcleo debía perder energía poco a poco, acercándose cada vez más a él hasta colapsarse. Sin embargo, en los experimentos no se observaba que los electrones se precipitaran hacia el núcleo ni que los espectros de energía fueran continuos.

Bohr conocía las ideas de Planck y Einstein acerca de la cuantización de la energía y las partículas de luz o 'fotones' y, aunque tenía sus reservas hacia ellas, decidió utilizarlas para resolver el problema del modelo atómico de Rutherford. En sus investigaciones Bohr descubrió que el momento angular de los átomos debía ser un múltiplo entero de h (la constante de Planck), lo que significaba que las posiciones de los electrones en el átomo debían ser discontinuas.

En su publicación de 1913 Bohr **postuló la existencia de órbitas estables** donde el electrón podía estar sin perder energía, esto es, donde la mecánica clásica era válida pero la electrodinámica no. Y en un segundo postulado **afirmó que cuando el electrón pasaba de una órbita a otra emitía o absorbía energía en forma de un fotón**, es decir, toda ella súbitamente.

Basado en estos dos postulados, Bohr calculó los espectros de emisión y absorción de energía que debía tener el átomo de hidrógeno y sus cálculos coincidieron de forma muy exitosa con la ley de Balmer y los espectros de radiación observados por Rydberg.

Como bien apunta el físico e historiador Helge Kragh, el proceso de transición de una órbita a otra no podía entenderse clásicamente, pero Bohr consideraba que era "necesario para dar cuenta de los hechos experimentales" (Bohr citado por Kragh, 1999, p.54). Como se dice comúnmente en filosofía de la ciencia, **Bohr hizo un modelo que salvaba los fenómenos.**

Tres años más tarde el matemático Somerfeld introdujo una generalización del modelo atómico de Bohr que reproducía la fórmula para los niveles de energía del átomo de hidrógeno y que caracterizaba los átomos mediante los números cuánticos **n** (principal) y **k** (azimutal). Somerfeld era experto en la aplicación de métodos matemáticos a problemas físicos y sus resultados fueron muy bien recibidos.

A pesar de los éxitos, los modelos atómicos de Bohr y Somerfeld no daban cuenta de la valencia y tenían dificultades al aplicarse a átomos más complejos que el hidrógeno.

Bohr quería encontrar un modelo de la estructura atómica que fuera aplicable para todos los elementos de la tabla periódica, y con este objetivo, propuso en 1923 una nueva teoría atómica: "Construyendo eléctricamente una mezcla de espectroscopía de rayos x, datos químicos, argumentos de correspondencia y vagos principios de simetría, Bohr edificó dos modelos atómicos cuánticos desde el hidrógeno hasta el uranio[...]Contrariamente a su imagen de 1913, los electrones ahora se movían en elipses keplerianas y, en su recorrido por las órbitas, penetraban la región de electrones internos [...]Aún cuando la teoría del sistema periódico de Bohr fue pronto reemplazado por mejores teorías, brindó por primera vez una **explicación** razonablemente satisfactoria de la estructura atómica de todos los elementos químicos." (Kragh, 1999, p.157, negritas mías). Como Bohr se resistía a aceptar la idea de los fotones, en 1924 propuso junto con Kramer otra teoría atómica que no los incluía, pero esta nueva teoría tenía la desventaja de ir en contra de la conservación de la energía y fue rápidamente refutada por los resultados experimentales.

En la literatura es común encontrar frases como la siguiente: "La idea [de 1913] de Bohr **explicaba** de una forma asombrosamente precisa y simple el hecho de que los átomos emiten luz de frecuencias características (series espectrales) bien conocidas pero **no explicadas**

hasta entonces." (Mariá Baig, 2002, "La contribución de Niels Bohr a la física del siglo XX", negritas mías). El mismo Bohr decía haber ofrecido "una **explicación completa** de las notables relaciones entre las propiedades físicas y químicas de los elementos, expresadas en la famosa tabla [periódica]" (Bohr citado por Elena Sanz, 2002, "La Era Atómica de la mano de Bohr", negritas mías).

Nadie niega a Bohr el gran mérito de haber llevado la idea de la cuantización de la energía a su modelo atómico ni las exitosas predicciones que obtuvo con él, precisamente por esas investigaciones le otorgaron el Premio Nóbel de Física en 1922. Sin embargo, hablar del poder **explicativo** del modelo atómico de Bohr resulta un poco precipitado si recordamos que Bohr **postuló** la existencia de estas **órbitas estables** y la emisión de energía cuantizada al pasar de una órbita a otra, sin ofrecer una explicación física. Esto es "¿por qué los electrones deben obedecer tales reglas que les prohíben dejar cierta clase de órbitas, como si fueran milagrosamente guiados por trayectorias simples? ¿Cuál era el origen de estos saltos cuánticos, que supuestamente no tenían ninguna duración?" (Laloë, p.657). Lo que queremos resaltar aquí, es que **ninguno de los modelos atómicos de Bohr**, ni el de 1913 ni los posteriores **explicaban** por qué las órbitas eran estables o por qué los electrones sólo podían estar en ellas y dejaba sin resolver la dificultad inicial, a saber, que los electrones moviéndose de manera acelerada no emitan radiación ni se colapsen con el núcleo atómico.



1.2 DESARROLLOS POSTERIORES

Alrededor de 1925 el francés Louis de Broglie mostró que a partir del comportamiento ondulatorio de los electrones podían describirse mejor los fenómenos atómicos que con el modelo de Bohr. De Broglie intentaba conciliar la teoría de la relatividad de Einstein con la teoría cuántica, y por eso combinó las expresiones para la energía de ambas teorías $h\nu=mc^2$. De esto se desprendía que a una partícula de masa **m** se le podía adscribir una frecuencia y una fase de onda características.

Basado en las ideas de De Broglie, el austriaco Erwin Schrödinger modificó la ecuación de onda usual y obtuvo una ecuación de onda para el átomo de hidrógeno que publicó en los *Annalen der Physik* de 1926. Kragh apunta que Schrödinger "introdujo su ecuación fundamental de onda en varias formas, pero ninguna reflejaba la ruta que lo había llevado originalmente a la ecuación" (Kragh, p.164).

De cualquier forma, con la nueva expresión pudieron calcularse muy bien los niveles atómicos de energía y Schrödinger proponía con ella una visión distinta de los saltos cuánticos. Para él, las transiciones de una órbita a otra debían analizarse en términos de la teoría ondulatoria y le resultaba mucho más gratificante "concebir una transición cuántica como un cambio de energía de un modo vibracional a otro, que verla como saltos de electrones" (Schrödinger citado por Kragh, p.165).

Aunque el mismo Schrödinger no era muy claro respecto al significado de la función de onda Ψ que resultaba de su ecuación, la ecuación en sí tenía la enorme ventaja de que proveía una herramienta matemática de cálculo mucho más accesible que las ofrecidas por modelos anteriores y se pudo aplicar con éxito a varios problemas de la física.

La ecuación de Schrödinger es casi contemporánea a la mecánica matricial que Heisenberg, Born y Jordan propusieron para hacer los cálculos atómicos. La polémica entre Werner Heisenberg y Schrödinger es famosa: generalmente se dice que los físicos matriciales defendían el análisis corpuscular de las partículas atómicas, mientras que Schrödinger defendía el análisis ondulatorio de las mismas. Sin embargo, Mara Beller ofrece un estudio detallado sobre este episodio de la cuántica, en donde muestra que la discusión, lejos de ser entre ondas y partículas, era alrededor de los "saltos cuánticos". Heisenberg y sus colegas tuvieron que rescatar los saltos cuánticos de Bohr para dar cuenta de los estados estables con su teoría matricial y Schrödinger como dijimos, siempre repudió estas extrañas transiciones¹.

Finalmente se demostró que los procedimientos matriciales eran matemáticamente equivalentes a la ecuación de Schrödinger, pero ésta última perduró por ofrecer cálculos más simples. Sin embargo, como apunta Beller, "aunque los métodos de Schrödinger tuvieron una victoria total, la interpretación que la mayoría de los físicos parecían aceptar era la de sus oponentes [Heisenberg et al]" (Beller, p.35).

Posteriormente el principio de incertidumbre de Heisenberg mostró que no era posible la existencia de órbitas electrónicas bien definidas. Fue así que poco a poco el modelo atómico de Bohr quedó superado poco a poco.

¹ Para más detalles ver el capítulo dos del libro Quantum Dialogue de Mara Beller, 1999.

Las excelentes predicciones obtenidas mediante el formalismo de la mecánica cuántica y una interpretación pragmática dominante en la comunidad científica, hicieron posible que la teoría cuántica siguiera desarrollándose sin ofrecer mayor explicación acerca de la estabilidad atómica y acerca de muchos otros problemas cuánticos. Pocos son los que se interesan por llenar los huecos de estas explicaciones físicas "perdidas" y más raro aún es encontrar a los que quieren que dichas **explicaciones sean realistas y causales**. Ana María Cetto y Luis de la Peña forman parte de este selecto grupo de físicos y nos ofrecen un punto de vista alternativo para analizar los problemas cuánticos a partir de la Electrodinámica Estocástica Lineal, una teoría que como veremos en este trabajo, implica una interpretación de la mecánica cuántica completamente distinta a la ortodoxa.



1.3 SOLUCIÓN DESDE LA ELECTRODINÁMICA ESTOCÁSTICA LINEAL

Ejemplificaremos el análisis que proponen los autores de la Electrodinámica Estocástica Lineal (EDEL) con el problema de la estabilidad atómica. En sus notas autobiográficas de 1948, Bohr confiesa: las capas atómicas junto con las líneas espectrales y sus consecuencias para la química "**se aparecieron ante mí como un milagro** y me parecen un milagro todavía hoy. Esta es la forma más sublime de musicalidad en la esfera del pensamiento [...] Nuestra penetración en el mundo de los átomos es sin duda una aventura comparable a los grandes viajes de los navegantes en busca de nuevas tierras y a las denotadas exploraciones de los astrónomos en las profundidades del espacio celeste." (Bohr citado por Elena Sanz, 2002, "*La Era Atómica de la mano de Bohr*"). Cetto y de la Peña también encuentran milagrosas las capas atómicas de Bohr y consideran que aún en los modelos posteriores de la teoría cuántica "los niveles atómicos estacionarios son bien predichos por las ecuaciones, pero la razón física de su estabilidad permanece escondida." (De la Peña y Cetto, 2005, negritas mías).

Desde el punto de vista de la EDEL el comportamiento cuántico de los electrones es un resultado de su interacción con el **campo de fondo** (también llamado campo de radiación de vacío, o campo de punto cero). Este campo estocástico de fondo es tratado como campo "virtual" o formal en la mecánica cuántica usual, pero la EDEL le asigna un carácter **real**: es un campo que abarca todo el espacio y es producido por el conjunto de cargas que constituyen el universo. Los electrones atómicos se encuentran

inmersos en este campo estocástico y pueden absorber energía de él. En la EDEL, la **estabilidad atómica** se alcanza cuando la potencia media de energía que el electrón absorbe del campo de fondo es igual a la potencia media de energía que radia por su movimiento orbital: "los niveles atómicos aparecen como aquellos estados [...] para los cuales la potencia radiada y la absorbida son iguales. El que los niveles pertenezcan normalmente a un espectro discreto viene del hecho de que sólo ciertos movimientos orbitales pueden alcanzar el equilibrio. En mecánica cuántica tal explicación es imposible, dado que no hay ningún campo desde el cual se absorba energía, y así el punto permanece como un misterio y sólo puede encontrar una respuesta formal." (De la Peña y Cetto, 2005, sección 7.1).

Como vemos, la EDEL explica la estabilidad atómica de una forma **realista y causal**. Realista porque se asume que el campo de fondo **existe** y causal porque la interacción entre este campo y los electrones es **la causa** del comportamiento cuántico².

Una diferencia importante entre el modelo de Bohr y el modelo de la EDEL es que las órbitas en las que se encuentran los electrones no son totalmente estables en la EDEL, sino que son "meta-estables", esto es, que son susceptibles de caer en la inestabilidad. Además Cetto y de la Peña señalan que a principios de siglo, cuando el problema del átomo estaba en el centro de la actividad científica, se asumió implícitamente que el átomo era un sistema aislado, "pero los átomos aislados no existen en la EDEL y no hay razón a priori para ignorar los efectos del campo de vacío [sobre las partículas subatómicas]" (De la Peña, 1983).

Para Cetto y de la Peña es más razonable ver al átomo como un sistema mecánico que está en íntimo contacto con un continuo, que considerarlo un sistema mecánico cerrado. Ellos sostienen que analizar la interacción del átomo con el campo de fondo tiene la ventaja, sobre los modelos mecánicos simples del átomo, de brindar un mecanismo para explicar la apariencia de las propiedades ondulatorias y otros fenómenos similares. (Más detalles en Cetto y de la Peña, *Quantum Dice*, p.66).

² En el apéndice 1 se presenta la demostración del Dr. Luis de la Peña de cómo las hipótesis básicas de la EDEL conducen a la existencia de una órbita estable en el átomo hidrógenoide.



1.4 ANTECEDENTES

La idea del campo de fondo y de utilizarlo para entender el problema de la estabilidad atómica fue propuesta originalmente por el físico Walter Nernst, quien en 1911 presentara la primera confirmación de la hipótesis cuántica de Planck y Einstein³. En 1916⁴ Nernst consideró el campo de fondo como un campo electromagnético de origen desconocido, que estaba presente en todo el espacio y que podía ayudar a explicar la estabilidad atómica brindando un mecanismo para compensar la energía que los electrones perdían por radiación al estar orbitando. Nernst además pensó que ese campo podía estar causando algunas de las propiedades cuánticas de la materia.

Más tarde (en 1947) Park y Epstein por un lado y Welton por otro, ofrecieron explicaciones de las emisiones atómicas utilizando también el concepto de campo de fondo, pero desde enfoques físicos distintos. Los autores de la EDEL consideran que ambas propuestas son parcialmente correctas y complementarias. También se pueden encontrar explicaciones que hacen referencia al campo de fondo en textos de Electrodinámica Cuántica, entre ellos el de Sciamia de 1979⁵. La explicación de la estabilidad atómica que proponen actualmente Cetto y de la Peña (2005-2006) en la EDEL rescata la idea de Nernst y algunos aspectos de las ideas de Park-Epstein y Welton.



1.5 OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS

El objetivo de este trabajo es resaltar algunas consecuencias filosóficas de la Electrodinámica Estocástica Lineal (EDEL). Para esto se presentan algunos de los principales problemas conceptuales de la mecánica cuántica (capítulo 2) y se analizan las respuestas que podemos

³ "Es obvio que el conjunto de las observaciones [sobre el átomo] proporciona una brillante confirmación de la teoría cuántica de Planck y Einstein" (Nernst citado por Penrose, p.158)

⁴ Nótese la cercanía de fechas con el modelo atómico de Bohr propuesto en 1913

⁵ [Sciamia, 1979]- Cualitativamente, la idea es que como el electrón atómico cae hacia el núcleo debido a la radiación, su frecuencia orbital se incrementa, y así la interacción dominante con el campo tiene lugar con modos de frecuencias mayores; como estos modos son más energéticos, el electrón extrae una cantidad mayor de energía del campo [Bergia 1991]. Como lo opuesto ocurre cuando el electrón gana energía, **una situación de equilibrio debe arribar en la cual las cantidades de energía radiada y absorbida son iguales**. Para que el argumento se sostenga es esencial que la densidad de energía espectral del campo sea una función creciente de la frecuencia, i.e., el campo de punto cero no puede ser identificado con un ruido blanco. (de la Peña y Cetto, 1983, *The Quantum Dice*, p.108) **nota**

darles desde el punto de vista de la EDEL (capítulo 3), como acabamos de hacer con el problema de la estabilidad atómica. Con la intención de tener una mejor perspectiva se contrastarán las propuestas de la EDEL con las de otras interpretaciones de la mecánica cuántica. Finalmente (capítulo 4), sin tomar partido a favor o en contra de la EDEL, haremos una reflexión de qué tan razonable puede ser su defensa frente a otras teorías.

El presente trabajo, a diferencia de lo que han escrito los autores de la EDEL, se aleja un poco del aspecto físico para enfocarse particularmente al aspecto filosófico de la teoría. Dado que la EDEL es una teoría que implica una interpretación de la mecánica cuántica muy distinta a la interpretación más aceptada actualmente (la interpretación ortodoxa) creemos que el estudio de sus consecuencias filosóficas es importante porque puede arrojar luz sobre las problemáticas abiertas respecto a los fundamentos de la mecánica cuántica.

Aunque hoy en día la discusión acerca de la mecánica cuántica es internacional y no puede dividirse por países, sí resulta particularmente interesante el hecho de que la EDEL sea una teoría propuesta por investigadores mexicanos; qué mejor que estudiar lo que hay en casa y tener un sistema de referencia para explorar nuevos territorios teóricos.



Capítulo 2. PROBLEMAS CONCEPTUALES DE LA MECÁNICA CUÁNTICA



2.1. INDETERMINISMO Y CAUSALIDAD

A menudo se utilizan los términos "determinismo" y "causalidad" de forma indistinta, pero en este trabajo marcaremos una diferencia entre ellos: nos referiremos con **causalidad** a una propiedad del **sistema** y con **determinismo** a una propiedad de **la descripción** que hacemos del mismo. El determinismo está relacionado con nuestra capacidad de predecir con exactitud, a partir de cierta información, resultados específicos¹.

La distinción entre determinismo y causalidad es muy importante porque la pérdida del determinismo en la mecánica cuántica ha llevado a muchos autores, entre ellos a Bunge y a Forman, a decir que la mecánica cuántica es acausal, pero con las definiciones que utilizaremos aquí, y que especificaremos a continuación, la acausalidad no se sigue del indeterminismo.

Cuando decimos que **determinismo** no se refiere al sistema estudiado sino a la descripción o al conocimiento que tenemos del mismo, queremos aclarar que **el sentido de determinismo que utilizaremos es puramente epistemológico y no ontológico**. Muchos autores como Laplace, Leibniz, de Broglie, Bridgman, Carnap, etc. encierran en el término "determinismo" la idea de que el futuro y el pasado están ya definidos de antemano, de tal forma que "dada una descripción total del mundo en un instante dado, entonces, con ayuda de las leyes, puede calcularse todo suceso pasado o futuro" (Carnap, 1966, citado por Lombardi, tesis doctoral, p.18). El término "determinismo" utilizado de esa manera, suele relacionarse con la causalidad y tiene una carga ontológica muy fuerte pues nos dice que el mundo en sí es determinista. En el presente trabajo nos deslindamos de ese sentido ontológico y adoptamos un sentido epistemológico, aplicado únicamente al conocimiento, diluyendo los compromisos acerca de cómo sea el mundo más allá de lo que nosotros sabemos sobre él. Este sentido epistemológico del determinismo que vamos a adoptar puede definirse de la siguiente manera: "se dice que poseemos un **conocimiento determinista** acerca de un sistema cuando el **conocimiento** de su estado en un instante

¹ Decidimos conservar el término "determinismo" y no reemplazarlo por "predictibilidad" porque en las discusiones sobre los fundamentos de la mecánica cuántica, sobretodo entre físicos, el término "determinismo" es más frecuente y consideramos oportuno aclarar en qué sentido lo entendemos.

dado permite **conocer** unívocamente su estado en todo instante posterior **dentro de un margen de error** acotado" (Lombardi, tesis doctoral, p.13)².

En algunas ocasiones los sistemas físicos son tan complejos que nuestras descripciones sólo pueden hablarnos de los posibles resultados, pero no pueden proveernos la predicción unívoca de sus estados posteriores. Entonces decimos que **la descripción** es **indeterminista**, pero esto no implica de ninguna manera que el proceso no tenga una causa. Podemos tener una descripción indeterminista y al mismo tiempo saber qué es lo que está **causando** el resultado.

En este trabajo entenderemos la causalidad de acuerdo con el sentido común, esto es, un sistema es causal si se tiene por un lado una causa, conocida o no, y por el otro lado un resultado que es efecto de ella. Siguiendo a D. Home definiremos dos tipos de causalidad:

1) Decimos que se cumple la **causalidad** (a secas) cuando sabemos cuáles son las causas que dan lugar a un efecto, aunque no haya necesariamente una secuencia temporal entre causa y efecto. Ejemplo de esto es la caída de las hojas en el otoño, causada por las condiciones ambientales y atmosféricas: las causas y el efecto están coexistiendo en un momento dado. Si además los valores de un sistema son calculables, de forma única, en cualquier instante, entonces decimos que se cumple la **computabilidad**.³

2) Decimos que hay **causalidad retardada** cuando claramente la causa se da primero y el efecto después⁴. Este tipo de causalidad está directamente relacionado con la noción de predictibilidad.

Una vez aclarado lo que entenderemos por causalidad y determinismo, pasemos a analizar lo que sucede en la mecánica cuántica.

Desde los primeros experimentos con sistemas cuánticos, se notó que bajo condiciones iniciales idénticas, no se podía determinar con exactitud el resultado que se obtendría, sino que sólo se podían hacer predicciones probabilísticas (por ejemplo, acerca de la región de una pantalla a la que llegará un electrón tras pasar por una doble rendija).

² Para más detalles ver el capítulo primero de la tesis doctoral de Lombardi titulado: El concepto de determinismo.

³ La computabilidad es menos general que la causalidad.

⁴ En este caso los eventos deben estar conectados por procesos físicos sucesivos en el tiempo, como ocurre en la termodinámica o la electrodinámica.

En otras palabras **había indeterminismo y no había computabilidad**. Esto también ocurre para algunos sistemas clásicos, el caso de los gases es un ejemplo muy claro de ello. Pero una de las particularidades de la mecánica cuántica consistía en que parte de la información era inaccesible en principio: no se podía conocer simultáneamente el momento⁵ y la posición de las partículas, ni cuál había sido su posición antes de una medición o las trayectorias que habían recorrido las partículas antes de ser detectadas. Además, en algunos casos, cambiar el dispositivo experimental provocaba que los resultados obtenidos fueran distintos, en condiciones tales que se hubiera esperado que no cambiaran.

Todo esto se debe en gran parte a que los sistemas cuánticos son fuertemente afectados al ser medidos, tanto que la perturbación frecuentemente tiene la misma magnitud que lo que se intenta medir. "La observación experimental de una propiedad deja al sistema cuántico en el estado correspondiente a la medición, pero nada dice sobre el estado del sistema antes de la observación" (de la Torre, 1992, p.58) Esto se comprende mejor si pensamos que cuando un fotón (cuando la luz) golpea a un electrón, este último sale totalmente del camino que estaba siguiendo alrededor del núcleo atómico y no podemos saber dónde estaba antes. Por eso suele decirse que es en principio inobservable.

El problema de la medición no es nada trivial y lo analizaremos con calma más adelante; aquí adelantaremos solamente un ejemplo que muestra la estrecha relación que existe en mecánica cuántica entre el problema de la medición y el problema de la causalidad: "Un núcleo radiactivo esférico que emite electrones es descrito por la mecánica cuántica mediante una función de onda ψ esférica para este caso. Sin embargo, con una cámara de burbujas observamos que los electrones emitidos siguen trayectorias rectilíneas. ¿Cómo podemos hacer compatibles ambos resultados?" (De la Peña, 1987, p.88) Es decir, ¿cómo explicar que el movimiento medido es de naturaleza radicalmente distinta al que se suponía antes de la medición?

Este tipo de resultados de la mecánica cuántica provocó que el debate respecto a la causalidad se agudizara, ¿la relación entre la descripción matemática de los sistemas cuánticos y los resultados medidos era como en la física clásica?, ¿Había que definir ahora un nuevo tipo de causalidad?, o ¿acaso ya no tenía sentido hablar de causas y efectos?

⁵ $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$, esto es, momento = masa * velocidad.

Ante las precisas predicciones⁶ obtenidas con el formalismo cuántico ¿vale la pena seguir preocupándose por las causas de los resultados, o basta con la información que ya tenemos? Como veremos más adelante, prácticamente cada interpretación de la mecánica cuántica tiene una respuesta distinta a estas preguntas.

Cuando se habla de determinismo y causalidad en mecánica cuántica es importante dejar claro que la ecuación de Schrödinger es perfectamente **determinista** en el siguiente sentido: la ecuación describe la evolución del sistema cuántico y uno puede calcular los valores de Ψ para tiempos futuros y pasados. Eso es algo que todos aceptan sin discusión, pero el problema surge cuando salimos del formalismo cuántico para entrar al ámbito experimental, cuando queremos contrastar con los sistemas, medirlos y manipularlos.

En el rincón de la mecánica cuántica que corresponde a la ecuación de Schrödinger (un rincón nada despreciable) encontramos algo de determinismo, pero en el resto la teoría cuántica parece dominar el indeterminismo. Como dice Home "[e]l determinismo en el sentido de predecir salidas individuales, a través de las cuales sea posible retrodecir la trayectoria de un sistema observado, aún no está satisfecha" (Home, p.344) y quizá nunca se satisfaga.

Bohm propuso una de las interpretaciones más fuertes enfocadas a erradicar el indeterminismo cuántico. Esta interpretación encontró adeptos de mucho peso por un lado y críticos muy severos por el otro. Fuera de Bohm y algunos otros casos, podemos decir que **la naturaleza probabilística de la teoría y el indeterminismo en las descripciones de los sistemas** que de ella se derivan, son características de la mecánica cuántica que **se aceptan de manera muy general**.

Los autores de la EDEL no son la excepción, admiten ambas características, pero no consideran que sean impedimentos para su propuesta de rescatar la causalidad.

- 2.1.1 ESQUEMA

⁶ Al decir "precisas predicciones" se está utilizando precisión en el sentido estadístico, esto es, no se sabe exactamente el resultado individual, pero la gráfica de n casos siempre coincide con la distribución predicha.

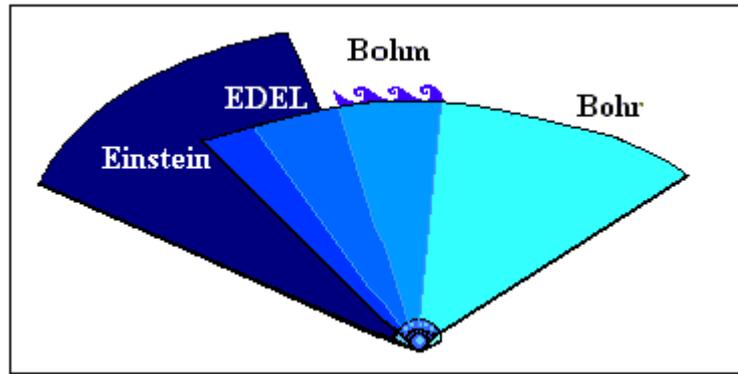


Figura 1. Abanico con algunas interpretaciones de la mecánica cuántica

En la figura 1 se muestra un esquema con algunas interpretaciones de la mecánica cuántica que serán tratadas en este trabajo. A la izquierda tenemos las interpretaciones que buscan un rescate de la causalidad más completo, donde los fenómenos tengan explicaciones compatibles con las demás áreas de la física. El abanico es más amplio en esa zona, porque esas interpretaciones hacen uso de otras teorías físicas para explicar o derivar la mecánica cuántica. Un poco más a la derecha tenemos la interpretación de Bohm, que también busca el rescate de la causalidad y el determinismo, pero se basa en la mecánica cuántica usual y le agrega algunas variables (comúnmente llamadas "variables ocultas"). Finalmente, en el extremo derecho, está la interpretación de Copenhague (propuesta originalmente por Bohr) que no busca más el regreso al determinismo y la causalidad en el sentido clásico.

Es muy interesante notar que los compromisos realistas van "disminuyendo" conforme avanzamos de izquierda a derecha, pero este punto quedará más claro cuando veamos con más detalle el problema del realismo cuántico y cómo lo aborda cada interpretación.



2.2 MEDICIÓN O COLAPSO

A partir de la ecuación de Schrödinger se obtienen los estados posibles de un sistema cuántico $(\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4, \dots)$, pero hay un **principio de superposición** en la mecánica cuántica que nos dice que además de éstas

soluciones, hay combinaciones lineales⁷ de ellas que son soluciones válidas también.

Una solución superpuesta puede ser de dos tipos:

1) Cuando describe un **estado puro** basta un cambio de base para que el estado del sistema cuántico quede representado mediante una sola función de onda Ψ_n (también llamado vector de estado).

2) Pero cuando la superposición corresponde a un **estado mezclado**, por más cambios de base que hagamos, no encontraremos ninguna que nos permita describir al estado mediante una sola función de onda Ψ_n . De hecho, en este caso, el sistema está constituido por varios subsistemas independientes, cada uno caracterizado por una función de onda distinta $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4, \dots$ y su estado sólo puede describirse de forma estadística.

Para hacer esta descripción estadística de los **estados mezclados** la función de onda ya no es suficiente, es necesaria una herramienta matemática más fundamental conocida como la **matriz de densidad** ρ , que está dada por la expresión

$$\rho = \sum w_i |\Psi_i\rangle \langle\Psi_i|, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$$

donde los coeficientes w_i nos dicen en qué proporción se encuentran los componentes del sistema correspondientes a cada Ψ_i . La matriz de densidad nos sirve para expresar tanto los estados mezclados como los puros, sólo que los estados puros son casos particulares en los que la matriz cumple con características especiales (como que $\rho^2 = \rho$).

Antes de pasar a un ejemplo que nos aclare todo esto, es preciso que respondamos a la siguiente pregunta: **¿por qué es tan importante para el problema de la medición que el estado esté descrito con un solo vector Ψ o no?** La importancia radica en que cada salida de los aparatos de medición corresponde a **un solo vector de estado Ψ** . En otras palabras, antes de medir tenemos un conjunto de soluciones posibles, pero en el momento de medir obtenemos solo un resultado, sin importar que el sistema haya estado en un estado mezclado, puro, superpuesto o no.

⁷ Las combinaciones lineales de $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4, \dots$ son todas aquellas sumas del tipo $\Psi = a \Psi_1 + b \Psi_2 + c \Psi_3 + d \Psi_4 + \dots$, donde los coeficientes a, b, c, d, \dots son números arbitrarios.

De aquí surge una de las preguntas cruciales de la mecánica cuántica: **¿a qué refiere esta función Ψ** cuyo valor está dado en números complejos? ¿Podemos siquiera afirmar que tiene un referente físico? ¿Nos da información sobre la probabilidad de obtener cada resultado? ¿Antes de la medición el sistema se encuentra en varios estados "simultáneamente"?⁸

2.2.1 EJEMPLO DEL ESPÍN

El espín es una propiedad asociada al momento angular del electrón, esto es, nos da información sobre la dirección en la que el electrón está "rotando". Dadas las orientaciones permitidas para el vector del momento angular, sabemos que el espín sólo puede tener dos valores (o bien $\frac{1}{2}$ ó bien $-\frac{1}{2}$) y por eso los estados base del espín (en la dirección del eje vertical) suelen definirse como:

$|\Psi_1\rangle = |\uparrow\rangle$ (arriba o positivo) y $|\Psi_2\rangle = |\downarrow\rangle$ (abajo o negativo).

Representemos a $|\uparrow\rangle$ por la matriz $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ y a $|\downarrow\rangle$ con la matriz $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

Entonces las siguientes matrices de densidad representan **estados puros**:

$$\rho_1 = |\uparrow\rangle\langle\uparrow| = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \rho_2 = |\downarrow\rangle\langle\downarrow| = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

En la primera matriz todos los componentes del sistema están en el estado $|\uparrow\rangle$ (por lo que $w_1 = 1$ y $w_2 = 0$) y en la segunda todos están en el estado $|\downarrow\rangle$ (por lo que $w_1 = 0$ y $w_2 = 1$).

Las matrices de densidad para **estados mezclados** serían como sigue:

Si la mitad de los componentes del sistema están en el estado $|\uparrow\rangle$ y la otra mitad en el estado $|\downarrow\rangle$ la matriz de densidad es:

$$\rho_3 = \frac{1}{2} \rho_1 + \frac{1}{2} \rho_2 = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad \text{y aquí notamos que } \rho^2 = \begin{pmatrix} \frac{1}{4} & 0 \\ 0 & \frac{1}{4} \end{pmatrix} \neq \rho$$

Otro estado mezclado estaría representado por la matriz

$$\rho_4 = (3/5)^2 \rho_1 + (4/5)^2 \rho_2 = 9/25 \rho_1 + 16/25 \rho_2$$

Haciendo una caricatura, lo que nos dice ρ_4 es que de cada 25 mediciones, 9 veces encontraremos al sistema en el estado $|\uparrow\rangle$ y 16 veces en $|\downarrow\rangle$.

Gráficamente los cuatro estados ejemplificados podrían verse así:

⁸ La famosa paradoja del gato fue propuesta por Schrödinger para mostrar lo absurdo que sería decir que el gato estaba "muerto" y "vivo" simultáneamente.

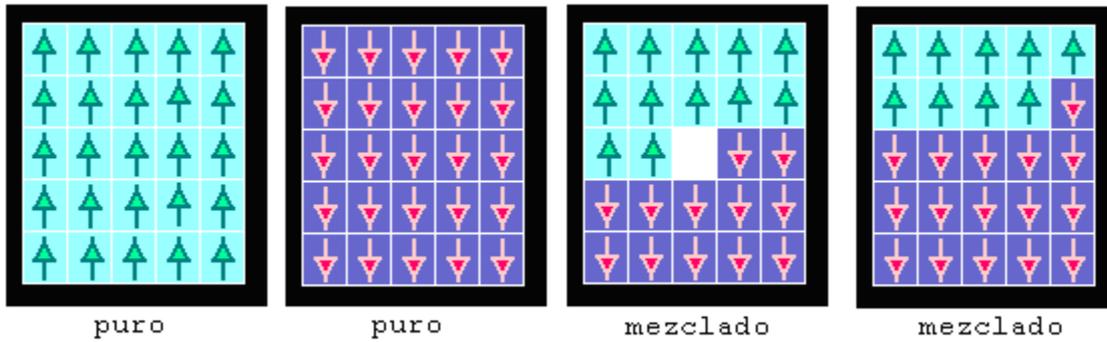


Figura 2. Estados puros y estados mezclados

Los cuatro ejemplos de matrices de densidad que mencionamos fueron escogidos de la manera más simple posible, pero los términos no-diagonales, (que corresponden a términos del tipo $w_i|\downarrow\rangle\langle\uparrow|$ donde se combinan los estados base) pueden ser distintos de cero, generando imágenes como la de la figura 3.⁹

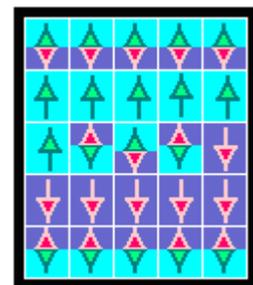


Figura 3

2.2.2 COLAPSO

Actualmente se dice que la función de onda Ψ nos da la "amplitud de la probabilidad", ya que propiamente la probabilidad de obtener el estado Ψ_i está dada por el valor $|\Psi_i|^2$ (la norma al cuadrado de Ψ_i). Esta idea tiene sus orígenes en la interpretación probabilística de Max Born. En la etapa fundacional de la cuántica Born habló de "ondas de probabilidad" y propuso el **postulado de la proyección**, según el cual la función de onda se "actualizaba" en el momento de la medición. Años después (en 1932) Von Neumann denominó "**colapso**" de la función de onda a esta "reducción" que se da en el momento de la medición y su concepción fue adoptada por muchos físicos ortodoxos.

El **problema de la medición** radica en entender qué sucede en ese preciso momento en el que se obtiene un resultado, alterando inevitablemente al sistema cuántico y "reduciendo" la información que obtuvimos con el formalismo a una sola opción. Del conjunto de estados coexistentes antes de la medición, obtenemos sólo uno, un dato en el aparato de medida, macroscópico y distinguible de los demás. Así, "lo crucial del problema es cómo reconciliar una función de onda Ψ con la ocurrencia de una salida definida." (Home, p.75)

⁹ Para más detalles ver el apéndice 2.

¿Durante la medición ocurre un proceso físico instantáneo que no somos capaces de detectar por su brevedad? ¿Podemos decir que el sistema se encontraba en ese estado antes de que nosotros lo midiéramos o fue el que midió o la medición la que determinó el resultado? ¿El formalismo cuántico es insuficiente y por eso no puede predecir la salida individual? ¿Las ecuaciones no están dando cuenta del proceso de medición? ¿A la mitad del experimento debemos considerar una Ψ reducida y otra sin reducir? O como diría David Wick "¿Puede un estudiante graduado colapsar la función de onda? [...] ¿Qué es responsable de esta instantánea, discontinua transformación del estado del sistema? (p.162, Wick)

Para Wick, no podemos decir con Born que la medición simplemente "actualiza el conocimiento" porque cuando medimos no sólo disminuimos nuestra ignorancia acerca de una variable del sistema. En algunas ocasiones, en particular cuando se mide una variable que está relacionada con otra mediante una relación de incertidumbre, medir una de las variables puede implicar un aumento en la ignorancia acerca de la otra.

Home por su parte, considera que la idea de Von Neumann de que la medición induce el colapso tampoco es adecuada, pues "asigna un papel especial a las interacciones de la medición, sin especificar el grado de complejidad con el que esas interacciones establecen una correlación entre observables de micro y macro sistemas, ni cómo se convierte en una medición". (Home, p.97) Para Home, el hecho de que la medición sea una interacción diferenciada de las otras, provoca un brinco arbitrario entre el micro y el macrodominio: "Es claro que un esquema lógicamente coherente que incorpore la noción de colapso de la función de onda Ψ debe tener una descripción matemática sin dicotomías entre medición y otras interacciones, lo cual no da lugar a brinco arbitrarios entre micro y macro sistemas [...] El proceso del colapso debe ser espontáneo en el sentido de estar presente en la ecuación fundamental per-se" (Home, p.98).

2.2.3 MODIFICACIONES AL FORMALISMO CUÁNTICO COMO SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE LA MEDICIÓN.

Los "modelos dinámicos" del colapso de la función de onda abordan el problema de la medición modificando el formalismo de la mecánica cuántica. Como explica Home, estos modelos hacen correcciones a la

ecuación de Schrödinger, adicionándole **términos** con las siguientes características:

- * Deben tener un efecto prácticamente despreciable para todos los microsistemas.
- * y deben ser capaces de inducir una eliminación rápida de estados distinguibles microscópicamente.

Con esto los modelos dinámicos aseguran:

- * La eliminación de manifestaciones cuánticas de superposiciones de estados distinguibles macroscópicamente, pues en el mundo macroscópico no se dan superposiciones.
- * y la definición de una salida individual.

Está fuera del alcance de este trabajo entrar en detalles formales y matemáticos de los modelos dinámicos propuestos a la fecha, sin embargo, es importante dejar clara la idea básica de que la incorporación de estos términos (no lineales) implica que la superposición entre estados sea sumamente inestable, y por tanto es más comprensible que en el momento de la medición el resultado se reduzca a un sólo estado.¹⁰ Un detalle a notar en estos modelos es que, como mencionamos antes, la ecuación de Schrödinger nos proporciona información sobre la evolución del sistema y la incorporación de los términos adicionales implica también una modificación en dicha evolución.

2.2.4 DECOHERENCIA

Otra forma de abordar el problema de la medición es decir que en este proceso, entre la Ψ con superposiciones de estados y la Ψ reducida, se da un fenómeno conocido como decoherencia.

La decoherencia fue introducida y desarrollada por Zeh y Wojciech Zurek en los años 1970's y actualmente se encuentra en plena etapa de investigación. Según este enfoque, la función de onda Ψ es una superposición de estados coherentes y la pérdida de la coherencia que existe entre ellos se da cuando el sistema físico interactúa con el medio ambiente que lo rodea: "La coherencia entre todos esos estados se manifiesta con la propiedad puramente cuántica de que pueden interferir unos con otros, al igual que las ondas. Al perder la coherencia desaparecen los efectos de onda y las probabilidades de los estados

¹⁰ Para más detalles ver Home, p, 101.

simplemente se suman, tal como sucede con las partículas macroscópicas.”
(Hacyan, 2004, p. 133)

Lalöe apunta la importancia de no confundir la decoherencia con el proceso mismo de la medición: “Durante la decoherencia, los elementos fuera de la diagonal de la matriz de densidad se desvanecen (decoherencia), mientras que en un segundo paso [en la medición] todos los elementos de la diagonal excepto uno deberán desvanecerse (emergencia de un resultado singular)”¹¹ (Laloë, p. 677).

Además, la decoherencia ocurre antes de la medición: “las superposiciones lineales de alguna forma se resuelven ellas mismas antes de que sean suficientemente macroscópicas como para involucrar aparatos de medición” (Lalöe, p.677) Esto es, la interacción con el medio ambiente provoca que los efectos de la superposición o interferencia cuántica sean prácticamente inobservables a escala macroscópica. (para más detalles ver Home, 3.3.4 Programa de la Decoherencia)

Aquí cabe preguntarse hasta qué punto se está resolviendo el problema, pues después de todo seguimos teniendo una distinción radical entre los micro y los macro sistemas (en el micromundo los estados son coherentes y en el macromundo no) y no queda claro en qué momento preciso se da la decoherencia ¿Si los aparatos de medición también están formados por átomos por qué interactúan con las partículas como un todo y no a nivel atómico? ¿La decoherencia está incluida en las ecuaciones o es un supuesto extra?

Dipankar Home hace un par de críticas al enfoque de la decoherencia, que pueden resumirse de la siguiente manera:

- 1) La descripción del fenómeno de la decoherencia depende de cómo modelamos el ambiente, por lo que no puede evitarse que la especificación de la interacción entre el sistema y el entorno sea ad hoc¹².
- 2) Los aspectos clásicos pertenecientes al mundo macroscópico no pueden hacerse consistentes con la teoría cuántica en algún

¹¹ Esto se explica con más detalle en el apéndice 2

¹² Esto es, si tomamos en cuenta diferentes factores del ambiente podemos estar hablando de formas de interacción entre el macro y el micro mundo distintas ¿Cómo sabemos cuáles son los factores relevantes?

límite, al menos no utilizando el formalismo estándar y los modelos de decoherencia. (Para más detalles ver Home, p.164).

Creo junto con Home y de la Peña, que ninguno de los enfoques sugeridos puede considerarse como una solución completamente satisfactoria al problema de la medición. Ninguno de los modelos propuestos ha alcanzado aceptación general, además de que ellos poseen un alto grado de arbitrariedad. Precisamente por eso sigue siendo un problema abierto a la discusión.



2.3 EL PAPEL DEL OBSERVADOR

Hay un aspecto también relacionado con la medición, pero no enfocado a la función de onda, sino al papel del observador en este proceso.

Como mencionamos, la intervención del científico altera al sistema indiscutiblemente y esto ha llevado a que algunas interpretaciones de la mecánica cuántica consideren que el observador es parte del sistema mismo.

La profundidad del problema es aún mayor si recordamos que algunas veces el diseño experimental (incluyendo al científico observador) parece determinar el fenómeno físico. Un ejemplo muy famoso de la relación entre el experimentador y el sistema físico que estudia es el del experimento de la doble ranura que veremos a continuación.

En el primer capítulo de su libro "*Física Volumen III: Mecánica Cuántica*" Feynman presenta una discusión muy interesante sobre el experimento de la doble ranura para balas, ondas de agua y varios dispositivos experimentales con electrones, aquí nos concentraremos en el problema conceptual que se presenta en dicho experimento.

En general, lo que se tiene es un dispositivo como el que se muestra en la figura 4. Los electrones son lanzados por un cañón hacia una plancha de metal delgada que tiene dos ranuras, y más atrás se coloca otra plancha o pantalla con un detector que contará el número de electrones en cada zona. El detector está conectado a un altavoz, con lo que escucharemos un "clic" cada vez que un electrón entre en él.

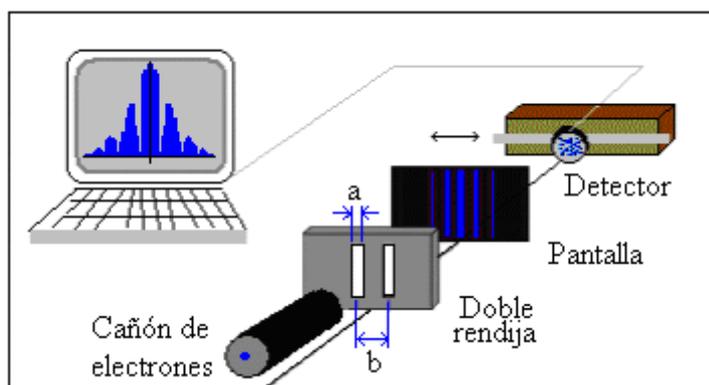


Figura 4. Dispositivo experimental con diafragma de doble ranura

Si tapamos una de las dos ranuras primero y la otra después, o si colocamos una lámpara que nos ayude a saber con un destello por qué ranura pasó cada electrón, obtenemos una distribución clásica igual a la que resulta cuando lanzamos balas, esto es, dos montones (como los que muestra la gráfica negra de la figura 5). Pero si quitamos nuestra lámpara y dejamos abiertas las dos ranuras, obtenemos un patrón de interferencia (como el centro de la gráfica de la figura 5) igual al que tendríamos si trabajáramos con ondas de agua.

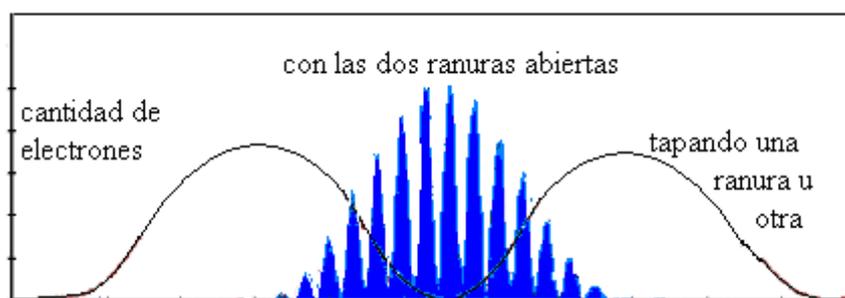


Figura 5. Resultados

Al bajar la intensidad de la lámpara sólo podemos detectar algunos de los electrones, y otros pasan sin crear un destello. El resultado sorprendente es que los electrones detectados se distribuyen clásicamente y los electrones no detectados forman el patrón de interferencia.

La pregunta que surge es ¿cómo "se entera" el electrón de que hay otra ranura abierta para cambiar su comportamiento? Y volviendo a la importancia del observador ¿por qué los electrones detectados u "observados" se comportan como partículas y los no detectados como ondas? ¿Somos nosotros con nuestras intervenciones los que determinamos las propiedades del electrón? Y si el observador es parte del sistema, ¿por

qué no está considerado dentro del formalismo? ¿Se puede incluir al experimentador como parte del ambiente en el enfoque de la decoherencia?

Algunas interpretaciones de la mecánica cuántica¹³ sostienen que la reducción de la función de onda se da cuando una mente interactúa con el sistema y adquiere conciencia del estado en el que se encuentra el sistema cuántico. Pero aquí más que resolver un problema parece que nos metemos en otro más grave aún, a saber, el problema de definir "qué es una mente humana, qué nivel de conciencia se necesita para reducir el paquete de onda, etc." (Lalöe, p.661)



2.4 NO LOCALIDAD

Muchos sistemas físicos, todos los clásicos por ejemplo, cumplen con la característica de ser **separables**. Esto significa que es posible separar al sistema físico **S** en dos partes **S₁** y **S₂**, de tal manera que al alejar lo suficiente una de otra cese toda interacción entre ellas. Naturalmente, si en estas condiciones se realiza una medición sobre la parte **S₁**, esto no afecta en lo absoluto a la otra parte **S₂**.¹⁴

Ahora bien, cuando **no** se cumple esta separabilidad, la medición en **S₁** afecta a su pareja **S₂**, sin importar que haya una separación espacial entre ellas. A este efecto se le conoce como **no localidad**. Así, "la no localidad implica que una entidad individual es afectada por mediciones (u otra forma de intervención) en un lugar lejano localizado en el espacio y el tiempo." (Home, p.191)

La gran mayoría de los físicos consideran que **los sistemas cuánticos son no-locales** y no son pocas las razones que tienen para defender su posición: los experimentos de Alan Aspect¹⁵ (1982) dieron soporte empírico a la idea de la no localidad y recientemente (2005) se realizó un experimento donde los sistemas entrelazados (*entangled*) se colocaron a una distancia récord de 11km.

Un argumento muy fuerte a favor de la no localidad es que ésta característica se desprende del exitoso formalismo cuántico. "Incluso

¹³ Entre ellas la "*Many-worlds interpretation*".

¹⁴ Esto claramente puede extenderse para n partes S_3, S_4, \dots, S_n .

¹⁵ En 1982 Aspect construyó un experimento con un intervalo espacialoide entre dos analizadores que detectaban el estado de S_1 y S_2 respectivamente, para que la información no pudiera propagarse entre los dos con una velocidad menor a la de la luz. El éxito de su experimento significó para muchos la confirmación de la no localidad cuántica.

cuando uno puede discutir si la mecánica cuántica es local o no a un nivel fundamental, es perfectamente claro que **su formalismo no lo es.**" (Laloë, p. 675)

La razón principal para afirmar que el formalismo cuántico es no-local es que hay magnitudes físicas en los sistemas cuánticos que **no pueden definirse independientemente** de otras magnitudes del sistema. En otras palabras, el valor que podemos asignarle a una observable mediante el formalismo cuántico no es independiente del valor de las demás observables y ésta característica del formalismo cuántico ha sido demostrada por resultados formales como el principio de incertidumbre de Heisenberg o el teorema Kochen -Specker y por resultados formales-experimentales como la violación de las desigualdades de Bell (veremos con más detalle estos principios y teoremas en la sección siguiente y sobretodo en el capítulo cuarto).

Una vez que se acepta que el formalismo cuántico es no local, según Home "será absurdo requerir un formalismo local a partir de una teoría no ortodoxa, especialmente si la teoría en cuestión es construida para reproducir los resultados de la mecánica cuántica." (Home, p.675) Home está apuntando aquí a una cuestión crucial para aquellos que proponen interpretaciones alternativas a la ortodoxa: Con la enorme cantidad de experimentos que se considera que respaldan al formalismo cuántico, se hace difícil rechazarlo o proponer uno nuevo, pero aquel que quiera sumar todo ese apoyo empírico a su teoría, tendrá que pagar el precio de la no localidad, a menos que ofrezca una explicación para impedirlo.

Lo delicado del problema de la no localidad es que tiene consecuencias conceptuales muy profundas y está conectado con el resto de los problemas que hemos venido planteando hasta ahora.

Por un lado, se relaciona directamente con el problema de la causalidad pues, si no hay localidad, entonces podemos decir que lo que sucede en un punto espacio- temporal puede afectar a algo que se encuentre en otro punto lejano de forma instantánea. Esto claramente implica la pérdida de la **causalidad retardada**, porque no hay una diferencia temporal entre la causa (medición de S_1) y el efecto

(afectación de S_2)¹⁶. "En un sentido amplio, la no localidad denota una forma de acción cuántica a distancia [...] pero] La diferencia entre esa acción a distancia y las que vemos [en física clásica, como la gravedad] es que no disminuye su intensidad cuando se incrementa la distancia." (Home, capítulo 4, p.191)

Por otro lado, la no localidad está directamente relacionada con el problema de la medición y de la interpretación que se tiene de este proceso: "En un sistema de muchas partículas ligadas, la noción del colapso [...] involucra, un efecto **no local** en la función de onda Ψ global del sistema compuesto." (Home, p.247, negritas mías).

Como vimos en la sección 2.2, un sistema cuántico puede estar en una superposición de estados antes de ser medido y la función de onda Ψ se "colapsa" en el momento de la medición. En estos términos, al registrar el valor de una variable, digamos la energía, en S_1 , "colapsamos" la función de onda que también afecta a la otra mitad del sistema compuesto, a la mitad ligada y alejada S_2 , encontrándonos con el fenómeno de la no localidad.

Es importante recalcar que en este tipo de afirmaciones no sólo se está aceptando implícitamente el colapso de la función de onda Ψ , sino que además falta definir en ellas qué se entiende por "separación espacial entre eventos físicos" pues hay interpretaciones que consideran que la función de onda Ψ es una representación abstracta (que sirve para calcular las probabilidades de los resultados de la medición) cuyo referente físico no es claro... ni es relevante aclarar.

También se está asumiendo que hay **entidades localizables** en el espacio y en el tiempo que se pueden medir y es aquí donde vemos la conexión con otro problema fundamental: el problema de la ontología de la teoría cuántica. El teorema de Bell habla precisamente de la estrecha relación entre la no localidad y el realismo en la teoría cuántica.

■ 2.4.1 COLAPSO RETARDADO

Una forma de responder al problema de la no localidad, es decir que la influencia sobre S_2 por la medición en S_1 no es instantánea, sino que se propaga con una velocidad finita. En esas circunstancias la función de

¹⁶ Hay quienes afirman que la no localidad, implica una violación de las leyes de la relatividad, porque la información viaja de S_1 a S_2 a una velocidad superior a la de la luz, pero este punto es controvertible y no lo abordaremos en este trabajo.

onda tiene entonces una especie de **colapso retardado** que no podemos detectar aún por las limitaciones técnicas actuales.

Algunos físicos trabajan en esta dirección. Squires, por ejemplo propone tomar una velocidad menor a la velocidad de la luz y considera que "la idea de colapso retardado *per se* no ha sido descartada empíricamente". (Squires citado por Home, p.250)

Los autores de la EDEL también creen que la información viaja de S_1 a S_2 con una velocidad finita y por tanto la causalidad (retardada o no) sigue intacta. La justificación de la EDEL para utilizar el formalismo cuántico sin aceptar la no localidad, y por tanto sin que la causalidad sea afectada, la veremos en el capítulo 3.

2.4.2 RESULTADOS NEGATIVOS

Un planteamiento que me parece particularmente atractivo es el de los resultados negativos, esto es, el de las mediciones que en lugar de registrar la ocurrencia de un fenómeno, registran su ausencia. Me parece que es muy perspicaz abordar el problema desde este punto de vista porque nos permite notar que hay algo inconsistente en las (comunes) interpretaciones que conjugan la idea de la no localidad, la idea del colapso de la función de onda y la de otorgar al observador un papel central durante la medición.

Para aclarar lo que quiero decir veamos un ejemplo famoso. Digamos que tenemos una caja cerrada con un átomo. Al empezar el experimento el átomo está en la superposición de dos estados, que corresponden respectivamente a estar en el lado derecho o en el lado izquierdo de la caja. La función de onda sería entonces

$$\Psi = a \Psi_d + b \Psi_i, \text{ donde } a \text{ y } b \text{ son números arbitrarios.}$$

Cortamos la caja por la mitad y separamos las dos partes obtenidas dejando una a once kilómetros de la otra. Luego iluminamos con un láser la que fuera la mitad derecha de la caja y vemos que el átomo NO está (porque no se dispersan fotones). La función de onda se colapsa y ni siquiera hemos afectado al átomo que está intacto en la mitad izquierda.

Frecuentemente se dice que la no localidad tiene lugar cuando el observador interviene afectando al sistema, pero en mediciones negativas como la de la caja es evidente que no hay interacción observador-átomo, y

aún así se tiene que aceptar que la medición está colapsando la función de onda y que está dando lugar al fenómeno de no localidad.

Este argumento suele utilizarse para defender que el átomo ya tiene un estado definido (no superpuesto) antes de la medición, pero lo conocemos hasta que realizamos la medición. Con esto, la idea de que la función de onda se "colapsa" en la medición ya no tiene sentido y el observador es despojado de su papel crucial en la escena. El contra argumento diría que el sistema no sólo está formado por el átomo, y que la mitad de la caja con la que interactúa el observador es parte tan importante del sistema como la otra que sí contiene al átomo.

Pasemos pues al siguiente problema de la mecánica cuántica que queremos plantear y nos está pisando los talones: el problema del realismo.



2.5 REALISMO

Si bien el término 'realismo' suele utilizarse con diversas acepciones, en el contexto del problema que nos ocupa el realismo es la postura filosófica que postula la **existencia independiente** del mundo externo y sostiene que ese mundo es el origen de los datos sensoriales. Así da cuenta de la coherencia entre los datos de diferentes individuos y del éxito de las teorías científicas que, según un famoso argumento realista, sólo podría explicarse por un milagro sin la existencia de esa realidad.

Quienes son realistas respecto al mundo externo (como los autores de la EDEL), suelen tener ciertos compromisos ontológicos extra: acerca de qué constituye ese mundo, cómo está estructurado, si se comporta de manera causal o no, etc.

La posición en el extremo opuesto al realismo es el idealismo, que subsume toda la realidad en el sujeto poniendo a veces la realidad de la mente por encima de la realidad material. Pero en la actualidad difícilmente encontraremos científicos cuánticos que sean idealistas en extremo. Existen varias posturas filosóficas intermedias que son mucho más comunes. Una de ellas es el llamado realismo interno, según el cual

nuestras observaciones pueden estar cargadas de las teorías en las que creemos. El **internalismo** se caracteriza por sostener que nuestras categorías mentales constituyen, al menos en parte, a los objetos que estudiamos.

Otra postura filosófica es el realismo empírico de los positivistas lógicos. Ellos propusieron el criterio verificacionista del significado, según el cual el sentido de una proposición estaba dado por ser verificable a través de los datos sensoriales (o por deducción lógica a partir de ellos). Bajo esta concepción el problema **p: existe un mundo objetivo independiente de la observación**, era un seudoproblema y la proposición **p** carecía de sentido, pues no era verificable empíricamente.

Dentro del positivismo lógico hubo quienes adoptaron una postura instrumentalista. El **instrumentalismo** considera que no tenemos por qué comprometernos con la existencia de términos teóricos como "gen" o "electrón", ya que simplemente pueden ser ficciones útiles para comprender el mundo, que pueden reemplazarse con puros términos observacionales.

Ante toda la problemática que se desencadenó con la mecánica cuántica, los fundadores de la teoría adoptaron diferentes posiciones ontológicas, cercanas a las que definimos arriba. Einstein, por ejemplo, siempre defendió una posición realista externalista, mientras que Bohr y Heisenberg, a pesar de sus diferencias, se inclinaban más por posturas instrumentalistas e internalistas. Bohr y Heisenberg tuvieron influencia de la visión positivista lógica y basados en ella se atenían al formalismo matemático y sus resultados observables, sin adquirir compromisos ontológicos acerca de las entidades con las que trataba la teoría cuántica.

Schrödinger por su parte, recibió influencias positivistas de Mach y de un realista como Boltzman, y fluctuó de una postura a la otra: durante mucho tiempo "tuvo la esperanza de reconciliar la teoría cuántica con el ideal objetivista, y salir del estéril formulismo" (Arana, 2002, p.76) pero más tarde se deslizó hacia la interpretación ortodoxa, la de la escuela de Copenhague.

■ 2.5.1 ARGUMENTO EPR¹⁷

¹⁷ Conocido así por las iniciales de sus autores: Einstein, Podolsky y Rosen.

En 1935 se publicó el famoso trabajo con la idea original de Einstein, pero que escribió básicamente Boris Podolsky y salió a la luz bajo la autoría ellos dos y de un asistente de Podolsky llamado Nathan Rosen. Allí los autores argumentaban que "si se adopta un punto de vista objetivo y realista claramente definido [por ellos], entonces la mecánica cuántica es una teoría incompleta." (Fine, 1986)

El criterio de mínimo realismo que propusieron los autores del artículo EPR fue el siguiente: diremos que una magnitud física es real, si el sistema tiene ya un valor definido para esa magnitud física antes de que se realice la medición. Esto es, si podemos predecir con certeza el valor de una magnitud física sin perturbar el sistema. Así, la magnitud es independiente de la observación y lo único que sucede al medir es que nosotros nos damos cuenta de cuál era su valor pre-existente.

Basándose en un ejemplo físico específico Einstein, Podolsky y Rosen hicieron una demostración impecable: partieron del supuesto de que las variables del sistema eran mínimamente reales (en el sentido que ellos definieron) y, dado que la mecánica cuántica no podía establecer todos los valores específicos anteriores a la medición de las variables, llegaron a la conclusión de que la teoría era incompleta. Los autores concluyeron que había "elementos de realidad" que la mecánica cuántica estaba ignorando y que eran necesarios para que la teoría fuera capaz de proveer la información faltante.¹⁸

Bohr respondió al artículo EPR, afirmando que los supuestos en los cuales se basaba no eran relevantes para el mundo cuántico; no puso en duda que el argumento fuera correcto, pero calificó sus supuestos de ambiguos.

¹⁸ De la Torre expone el argumento mediante el siguiente esquema lógico: Sean **LC** = Lógica Clásica; **FMC** = Formalismo de la Mecánica Cuántica

REA = Realismo mínimo; **COM** = Teoría completa; **SEP** = Sistemas Separables

Lo que se demostró en el argumento EPR fue que es contradictorio afirmar la validez de todos estos elementos simultáneamente, esto es que: $\vdash \neg LC \vee \neg FMC \vee \neg REA \vee \neg SEP \vee \neg COM$

Así, si asumimos los primeros cuatro (que ellos consideraban incuestionables), tenemos que $LC \wedge FMC \wedge REA \wedge SEP \vdash \neg COM$

Resulta sumamente interesante de este esquema es que, la negación de cada uno de los elementos ha dado lugar a nuevas ramas de investigación y a posturas distintas: lógicas no clásicas, antirrealismo, o teorías que proponen completar la mecánica cuántica mediante la introducción de nuevas variables. La no separabilidad se investiga intensamente en la actualidad con el objetivo, entre otros, de producir computadoras cuánticas.

2.5.2 TEOREMA DE VON NEUMANN Y TEOREMA DE BELL

Poco después de que se publicara el artículo EPR el matemático Von Neumann demostró que completar la mecánica cuántica con variables ocultas¹⁹ era incompatible con el formalismo de la mecánica cuántica. Para muchos esto hacía evidente que las **interpretaciones de variables ocultas eran imposibles.**

Sin embargo, años más tarde Bell demostró que el teorema de Von Neumann no tenía las implicaciones originalmente extraídas de él porque, a pesar de ser un resultado matemático impecable, sus supuestos tenían una validez física muy restringida. "Bell dudó sobre la relevancia (¿no sobre la corrección matemática!) de la prueba de Von Neumann" (Jammer, p.302)

La falta de claridad en la demarcación entre sistemas y observadores era algo que incomodaba a Bell y por eso se interesó en el estudio de las variables ocultas. En un nuevo análisis de un ejemplo análogo al utilizado por EPR, Bell (1965) partió de un supuesto realista (o de variables ocultas) y de un supuesto local²⁰ y dedujo lo que se conoce como la desigualdad de Bell.

Dicha desigualdad fue violada experimentalmente y comúnmente se acepta que esto mostró que **no pueden defenderse simultáneamente una interpretación realista y la localidad de los sistemas cuánticos.**²¹

La contribución de Bell fue esencial para las discusiones sobre los fundamentos de la mecánica cuántica, y es todavía una referencia obligada, por tres razones: por un lado, su desigualdad se desprendía de un análisis muy breve y sencillo; por el otro, Bell brindó un resultado contrastable empíricamente, que fue llevado al laboratorio; y por último la violación de la desigualdad de Bell para partículas separadas macroscópicamente, implicaba el repudio de la noción de localidad que subyace a toda la física clásica.

¹⁹ Comúnmente se les llama "variables ocultas" a aquellas variables que "completarían" a la mecánica cuántica. Pero en el artículo de EPR nunca se menciona el término.

²⁰ Bell asumió que el espín de las partículas existía independientemente de su observación, es decir, que era una variable real. y que podían medirse los espines de un gran número de pares de partículas sin que los valores de unas afectaran a los otros, i.e., que eran locales y separables.

²¹ En palabras de Jammer, la violación de la desigualdad de Bell fue evidencia de que "una teoría local de variables ocultas no puede reproducir todas las predicciones de la mecánica cuántica." (Jammer, p.303)

La presencia de la no localidad que salió a la luz con la violación de la desigualdad de Bell tuvo repercusiones enormes: en particular, **la idea de que la teoría cuántica era no local tomó mucha fuerza y llevó a muchos a afirmar que la teoría era incluso acausal.** "La idea de causalidad, siguió siendo básica, pero no tan universal como uno podría haber pensado antes del teorema de Bell" (Laloë, p.672). La idea de que la no localidad implica acausalidad es debatible, pero lo que queremos resaltar aquí es que ganó mucha aceptación.

Como hemos venido mencionando, la postura ortodoxa influida por ideas de corte positivista y contraria a una interpretación realista, se abstiene de adjudicar realidad a las entidades cuánticas cuando no son observadas, esto es, cuando no se manifiestan a través de una medición. Esta idea terminó convirtiéndose en la posición dominante en la comunidad de los físicos cuánticos. Llevándola al extremo, el Dr. Shahen Hacyan afirma por ejemplo, que "en el salto cuántico de una órbita a otra los electrones pierden toda realidad física" (Hacyan, p.128)

Sin embargo, no podemos concluir esta sección sin mencionar que, aún en la actualidad, se cuestiona la eficiencia de los experimentos que violan las desigualdades de Bell. Los autores de la EDEL sostienen que para cada experimento en el que la desigualdad ha sido violada, cabe una explicación causal que preserva la localidad y que toma en cuenta la eficiencia de los aparatos de detección utilizados en los experimentos, entre otros elementos. "De hecho hay posibilidades lógicas, tradicionalmente llamadas *loopholes*, que siguen abiertas para aquellos que desean restaurar el realismo local. Uno puede por ejemplo negar la existencia de cualquier conflicto real entre los resultados experimentales y las desigualdades de Bell." (Laloë, p.673, negritas mías). Como apunta Laloë, la existencia de estos "huecos" de la teoría cuántica es reconocida por muchos especialistas, Emilio Santos y Marshall por ejemplo, han trabajado en esta dirección durante muchos años, pero hay otros físicos que no toman en serio a los "huecos" cuánticos y los critican por su carácter *ad hoc*.

Fue necesario que pasaran muchos años para que teoremas como el de Von Neumann y Bell, junto con otros "teoremas de imposibilidad" perdieran la importancia que se les adjudicó inicialmente. Según Laloë, ahora esto se reconoce de forma más general y por eso se acepta con mayor facilidad

la pluralidad de interpretaciones. (Para más detalles, ver Laloë, capítulo 6)

Como comentábamos al principio de esta sección, Einstein defendió una postura realista y así fue hasta su muerte; por otro lado, los defensores de la interpretación ortodoxa se inclinaron por una visión de corte positivista que fue ganando mucho terreno desde entonces hasta nuestros días.

El choque entre la influencia realista de Einstein y la influencia positivista de Bohr en palabras de Artur Fine "*es una especie de esquizofrenia en la teoría cuántica*". (Fine, 1986, p.51). En la próxima sección analizaremos con detalle estas dos posiciones opuestas y sus respuestas no sólo hacia el problema del realismo, sino hacia todos los problemas conceptuales de la mecánica cuántica que hemos esbozado.



2.6 RESPUESTAS PROPUESTAS POR LA INTERPRETACIÓN ORTODOXA Y LA INTERPRETACIÓN REALISTA



2.6.1 UN PEQUEÑÍSIMO SUELO COMÚN

Antes de pasar a ver con detalle las respuestas que ofrecieron algunos físicos como Bohr y Einstein a los problemas conceptuales de la mecánica cuántica, mencionaremos tres cuestiones acerca de esta teoría que se aceptan sin discusión, un pequeñísimo suelo común en el que los físicos cuánticos pueden pararse al discutir:

1) En general, se acepta que la ecuación de Schrödinger (o la de Von Neumann para la matriz de densidad) permite hacer cálculos relativamente directos de la probabilidad asociada con cualquier serie de mediciones.

2) En particular, la evolución del sistema descrita por la ecuación de Schrödinger es causal y computable (porque dada Ψ en un instante, podemos calcular sus valores en otro tiempo dado).

3) Es cuestionable la aceptabilidad de la coexistencia de dos postulados para la evolución de la función de onda, a saber, la ecuación de Schrödinger por un lado y el postulado del colapso de la función de onda por el otro.

2.6.2 INTERPRETACIÓN ORTODOXA

Si bien hoy puede decirse que hay tantas interpretaciones de Copenhague como autores que se han declarado defensores de esta interpretación, suele subsumirse bajo este rótulo a la interpretación ortodoxa que, bajo influencias positivistas y retomando varias ideas de Niels Bohr y de Werner Heisenberg, se ha convertido en la interpretación dominante en la comunidad física.

RESPECTO AL REALISMO, AL INDETERMINISMO Y A LA MEDICIÓN

La posición ortodoxa sostiene que la mecánica cuántica es en esencia **indeterminista** y niega que las leyes estadísticas se puedan reducir a leyes deterministas algún día. Desde esta perspectiva, la función de onda ψ nos da la descripción más completa que se pueda tener del sistema cuántico²² y no tiene sentido hablar de las trayectorias o las posiciones de las partículas antes de la medición.

Los ortodoxos consideran que el sistema físico es alterado al hacer la medición y afirman junto con Von Neumann que al medir el observador **colapsa** la función de onda ψ . Para ellos **es imposible** ir más allá del formalismo de la mecánica cuántica y **completarla**.

Por lo tanto, desde una posición ortodoxa, la teoría es completa y no tenemos por qué aceptar el realismo. En este sentido, Bohr decía que "la teoría física ha de conjugar conceptos lógicamente incompatibles y que para ello [era] preciso renunciar al determinismo y a la pretensión de un realismo objetivista ingenuo" (Arana, *Causalidad y Objetividad*, p.73).

RESPECTO A LA CAUSALIDAD Y LA NO LOCALIDAD

La interpretación ortodoxa admite que **la función de onda ψ** satisface la **causalidad** y la **computabilidad**. Así, "las relaciones causales, determinadas por la ecuación de Schrödinger, se dan entre los valores de una ψ en diferentes instantes" (Home y Whitaker, 1991, p.253).

²² Esta afirmación ortodoxa de que la función de onda da la descripción completa del estado es sumamente frecuente en la literatura, pero cabe preguntar entonces ¿qué tan amplia es la validez de la ecuación de Schrödinger si sólo describe la evolución causal y se requiere un postulado adicional (colapso de Ψ) para explicar los resultados medidos?

Debe quedar claro que éstas "relaciones causales" y esta "idea de la causalidad" a las que se refieren Home y Whitaker, son completamente distintas a las que se encuentran en la física clásica porque se refieren a la función ψ , esto es, a una entidad matemática cuyo referente físico no está claro y que para los ortodoxos no tiene sentido aclarar. Es por esto que, en general, se entiende que quienes de uno u otro modo se enrolaron en las filas de la ortodoxia, como Heisenberg, Born y Bohr, simplemente **renunciaban al determinismo** y, respondiendo a una actitud de corte neopositivista, se atenían puramente al formalismo matemático y a los resultados experimentales.

Home da a entender que si bien la función de onda ψ de la interpretación ortodoxa cumple con la **causalidad**, la predictibilidad y la **causalidad retardada** pierden importancia, puesto que "si ψ es un artefacto simbólico para calcular resultados estadísticamente verificables [como ocurre en la interpretación de Bohr], entonces los aspectos de la no localidad [y con ellos los de la **causalidad retardada**] carecen de importancia" (Home, 1997, p.332)

En efecto la ausencia de localidad no es un problema para los ortodoxos, simplemente la aceptan. Bohr, por ejemplo, creía que no debíamos adscribir ninguna realidad mutuamente independiente a los sistemas parciales S_1 y S_2 , incluso si estaban separados espacialmente; así, consideraba que los sistemas físicos **no** eran separables y no era ningún motivo de preocupación para él si esto llevaba a una pérdida de la causalidad o no.

RESPECTO AL PAPEL DEL OBSERVADOR

En general, la posición ortodoxa adjudica un papel relevante al acto de observación, sea bajo la forma de una interacción entre los aparatos de medición y el sistema cuántico microscópico o en términos del observador participando activamente en la actualización de la medición.

Bohr, por ejemplo, argumentaba que la interacción entre los objetos y los aparatos de medición definía a los fenómenos cuánticos, y que por tanto "es imposible que la teoría cuántica pueda de alguna forma 'reflejar' como espejo la realidad." Para él era imposible "cualquier separación radical entre el comportamiento de los objetos atómicos y la interacción con los instrumentos de medida que sirven para definir las

condiciones bajo las que aparecen los fenómenos." (Arana, *Causalidad y Objetividad*, p.76)

"De hecho, la particularidad de los efectos cuánticos típicos encuentra adecuada expresión en la circunstancia de que cualquier intento de subdividir los fenómenos exigirá un cambio en el dispositivo experimental, introduciendo nuevas posibilidades de interacción entre los objetos y los instrumentos de medida que en principio no se pueden controlar. De acuerdo con esto, las pruebas obtenidas bajo condiciones experimentales diferentes no pueden ser entendidas dentro de una única imagen, sino que deben ser consideradas complementarias en el sentido de que solamente la totalidad del fenómeno es capaz de agotar la posible información sobre los objetos... en el dominio atómico la única forma en que el observador (junto con su equipo) puede permanecer al margen es cuando no observa nada en absoluto. Tan pronto como dispone sus herramientas de observación en la mesa de trabajo el sistema que ha elegido para realizar la observación y los instrumentos de medida que le sirven para hacer el trabajo ya forman junto con el fenómeno un todo inseparable." (Bohr citado por Holton, 1973, p.123)

De este modo, **Bohr incorpora al sujeto que estudia el fenómeno en el fenómeno mismo**, por lo que siempre deben tomarse en cuenta las condiciones bajo las cuales llevan a cabo los experimentos. No pueden entenderse objeto y sujeto uno independientemente del otro, forman un todo y si nos falta la visión global no podemos obtener toda la información que deseamos. Un fenómeno para Bohr era "la descripción de lo que se va a observar y del aparato que se usa para efectuar la observación...es posible expresar la totalidad de la naturaleza solamente a través de descripciones de forma complementaria. Las descripciones contradictorias, aparentemente paradójicas, no deben desviar nuestra atención de la globalidad esencial." (Bohr citado por Holton, 1973, p.126)

Un aspecto característico de la interpretación de Bohr, que aparece en la cita anterior y que está directamente relacionado con el carácter holista que Bohr veía en la descripción cuántica, es su principio de "complementariedad" al que dedicaremos la siguiente sección.

EL PRINCIPIO DE COMPLEMENTARIEDAD DE BOHR

En el Congreso de Física de 1927 que se llevó a cabo en la ciudad de Como, Italia, Bohr presentó una larga ponencia frente a varios de los físicos más destacados de la época: Max Born, A. H. Compton, Enrico Fermi, Paul Dirac, Heisenberg, H. A. Lorentz, Robert Millikan, Wolfgang Pauli, Max Plank, Arnold Sommerferld, Otto Stern y el gran ausente fue

Albert Einstein. Allí Bohr habló por primera vez públicamente del **principio de complementariedad** y lo presentó como "un punto de vista general... útil para armonizar los enfoques aparentemente conflictivos mantenidos por distintos científicos" (Bohr citado por Holton, 1973, p.119)

El Prof. Fred L. Wilson del Instituto de Rochester sostiene que la imagen del electrón como partícula por un lado y como onda por otro, fue lo que indujo a Bohr a proponer el principio de complementariedad. Es muy probable que Wilson esté en lo correcto, pero esa es sólo una entre varias de las fuentes de inspiración de Bohr.²³

Según el **principio de complementariedad** dice que la naturaleza muestra facetas que se excluyen mutuamente, pero que nos brindan información esencial acerca de los fenómenos estudiados y que por tanto se complementan y son igualmente necesarias. "Lo contrario [decía Bohr] no es una contradicción, sino complemento del ser".²⁴

En el congreso de 1927 Bohr mencionó como ejemplo de complementariedad el caso de la **luz**: "Su propagación en el espacio y el tiempo se describe adecuadamente por medio de la teoría electromagnética. Los fenómenos de interferencia en el vacío y las propiedades ópticas de los medios materiales en especial, están regidos completamente por el principio de superposición de la teoría **ondulatoria**. Sin embargo, la conservación de la energía y el momento durante la interacción entre la materia y la radiación, tal como se evidencia en el efecto Compton y en el efecto fotoeléctrico, encuentra expresión adecuada precisamente en la **idea cuántica de la luz** que fue adelantada por Einstein...tenemos actualmente dos teorías de la luz, ambas indispensables, pero hay que reconocerlo, sin ninguna conexión lógica entre ellas a pesar de veinte años de enormes esfuerzos de los físicos teóricos" (Bohr citado por Holton, 1973, p.120)

Folse comenta que Bohr siempre fue cuidadoso en enfatizar que la complementariedad era un punto de vista que, ante "el inesperado descubrimiento empírico del postulado cuántico estábamos forzados a tomar" (Folse, 1985, p.10) para desarrollar una descripción exitosa de los fenómenos de la física atómica.

²³ El vitalismo de su padre fisiólogo, el holismo de Gödel y la filosofía de William James, son algunas de las fuentes de inspiración que se atribuyen a Bohr.

²⁴ Nota que escribió Bohr en un pizarrón de la Universidad Estatal de Moscú.

Para Bohr, la complementariedad era una estructura conceptual a través de la cual se podían resolver las paradojas de la mecánica cuántica, tales como la incompatibilidad entre la física clásica y la moderna o la imposibilidad de separar a los 'objetos' atómicos del 'sujeto' (o del arreglo experimental) que los mide.

Home y Whitaker afirman incluso que la "complementariedad [es] una **generalización racional de la idea de la causalidad**" (Home y Whitaker, 1991, p.253). Además de la aplicación de la complementariedad en la física, Bohr consideraba que podía ser útil para la descripción de la naturaleza y para análisis en otros campos del conocimiento. Su escudo (Fig.4) muestra hasta qué punto Bohr consideraba la complementariedad como parte esencial de su pensamiento²⁵.



Figura 6. Escudo de Niels Bohr que él mismo diseñó y eligió en 1947.

2.6.3 INTERPRETACIÓN REALISTA

Einstein, quien puede considerarse el exponente paradigmático de una postura realista ante la mecánica cuántica, nunca aceptó el principio de complementariedad de Bohr: "Me parece una equivocación permitir que las descripciones teóricas dependan directamente de aserciones empíricas, tal como parece intentarse, por ejemplo, en el principio de complementariedad de Bohr, cuya formulación precisa, además he sido incapaz de conseguir a pesar del esfuerzo que he puesto en ello" (Einstein citado por Holton, 1973, p.125)

La complementariedad estaba relacionada con cierto abandono del sentido común y de la lógica clásica que Einstein no compartía ni estaba dispuesto a tolerar. Para Einstein la ciencia debía ser un refinamiento del pensamiento cotidiano y las teorías científicas debían ser de preferencia monistas, esto es, sostener la existencia de un solo tipo de objetos; por eso no aceptaba la dualidad de objetos con características de onda y partícula.²⁶

²⁵ En el apéndice 3 se presenta una breve biografía de Niels Bohr (1885-1962).

²⁶ Einstein consideraba problemático adscribir realidad física al aspecto ondulatorio y al aspecto corpuscular simultáneamente: si la partícula localizable cargaba toda la energía y el momento, entonces la onda asociada a ella estaba vacía, era una especie de **onda fantasma** a la que difícilmente podríamos asignarle

RESPECTO AL REALISMO Y AL DETERMINISMO

En oposición a la posición ortodoxa, Einstein siempre fue partidario del **realismo** y el **determinismo**, tanto que trató de demostrar que el principio de incertidumbre de Heisenberg era falso. Para Einstein era primordial dar a la teoría cuántica una ontología que la sostuviera y no encontraba esto en la visión de Bohr. En parte por eso, aunque en un principio coincidía con la idea positivista de basar el conocimiento científico en lo empírico, abandonó más tarde la visión positivista para defender que había mucho más que lo directamente observable.²⁷

Einstein atribuía la falta de certeza en la cuántica a nuestra ignorancia y a que la teoría era incompleta²⁸. Él seguía "creyendo en la posibilidad de construir un modelo de la realidad, es decir, de una teoría que represente las cosas en sí mismas y no sólo la probabilidad de su ocurrencia." (Einstein, citado por de la Peña, 1987, p.75).

Como pudimos ver en el argumento EPR, Einstein suponía que había valores iniciales en los sistemas, aunque no los conociéramos, y criticaba al grupo de Copenhague por dar una interpretación incorrecta a la función de onda ψ . En una de sus críticas afirma que la "función ψ no describe de ninguna forma una condición de un sistema individual; habla más bien de varios sistemas, de un '**ensamble de sistemas**' en el sentido de la mecánica estadística" (Einstein citado por Home y Whitaker, p.266, negritas mías).

Vale la pena aclarar que, para Einstein interpretar estadísticamente a la función de onda ψ era la **única salida posible** dado el marco de la mecánica cuántica estándar. Pero ésta era una salida que no le dejaba en absoluto satisfecho; Y no es que Einstein tuviera algo en contra de las teorías estadísticas en física; de hecho, él desarrolló una teoría estadística clásica, e incluso la cuántica de bosones. "La razón de que

un valor real. Lo recomendable era tener un solo objeto, al que sí se le adscribiera completa realidad.

²⁷ Por varios años, después de su artículo sobre relatividad especial de 1905, Einstein creyó en la idea positivista de que un concepto significativo en ciencia está definido en términos de procesos de observación adecuados. Pero para 1926 Einstein había abandonado ya completamente el positivismo y afirmaba que era una quivocación tratar de fundar una teoría sólo en magnitudes observables. (Para más detalles ver Home, p.351)

²⁸ En el ejemplo del núcleo radiactivo planteado en la sección 2.1, Einstein diría que ψ describe el hecho de que los electrones son emitidos en todas direcciones con igual probabilidad, pero que lo que medimos es el caso individual de un electrón, del que no puede darnos cuenta ψ .

encontrara el aspecto estadístico de la mecánica cuántica insatisfactorio, era primordialmente que creía que esa característica era consecuencia del fracaso en proveer una descripción completa de los fenómenos microfísicos individuales. [Así, Para Einstein los ensambles eran] un parámetro retóricamente apto para llamar la atención a la incompletitud de la teoría cuántica". (Home, 1997, p.372). De hecho, la estrategia de Einstein para atacar a la interpretación ortodoxa era escoger ejemplos en donde se demostrara que suponer la completud de la mecánica cuántica llevaba a consecuencias inaceptables.

En breve, desde el punto de vista einsteniano, la naturaleza estadística de ψ demostraba que la teoría cuántica era una teoría incompleta que **debía ser completada "desde afuera", por construcción de una teoría más general, que abarcara la relatividad general y que incluyera los resultados de la teoría cuántica como una aproximación.** Pero el camino correcto para completar la mecánica cuántica **no** era aumentar o ajustar el formalismo cuántico conocido, como hizo Bohm en la interpretación causal, sino construir toda una nueva teoría unificadora a partir de la cual pudiera derivarse la mecánica cuántica. Una teoría completa en la que cada elemento de la realidad física tuviera su contraparte teórica.

RESPECTO A LA CAUSALIDAD Y LA LOCALIDAD

Desde el punto de vista einsteniano, la no localidad de la función de onda es una consecuencia del formalismo matemático que no tiene relevancia física ni valor real.²⁹

El sueño de Einstein era "una teoría más profunda de sistemas y eventos microfísicos individuales, donde se preservaran la **causalidad** y la **localidad**" (Home, 1997, p.374, negritas mías). Esto es, donde la **causalidad** y **causalidad retardada** se cumplieran para sistemas físicos **reales y separables**. El compromiso einsteiniano con la separabilidad era muy fuerte, pues llegó a afirmar que sin ella se acababa la posibilidad de hacer ciencia. Él pensaba que "los sistemas separados espacialmente deb[ían] tener estados definidos asociados con cada uno de ellos y el estado conjunto de los sistemas deb[ía] ser determinado completamente por esos estados separados" (Einstein, citado por Home, 1997, p.350).

²⁹ Se da en el espacio de configuraciones, que ni siquiera puede relacionarse con el espacio-tiempo 4-dimensional en el que vivimos.

A diferencia de Bohr, Einstein sí sentía una profunda preocupación por la falta de localidad en la mecánica cuántica, pues consideraba que era una condición indispensable para poder contrastar la teoría, requisito que consideraba fundamental para cualquier teoría física.

RESPECTO A LA MEDICIÓN Y AL PAPEL DEL OBSERVADOR EN ELLA

Einstein no estaba satisfecho con el intento de solución al problema de la medición en términos del **colapso** de la función de onda. Afirmaba: "si la mecánica cuántica se completara, introduciendo una descripción realista adecuada, entonces tales problemas básicos como la medición serán resueltos automáticamente" (Einstein citado por Home, 1997, p.373).

Además, negaba el papel fundamental del observador en la determinación de la realidad física. "Einstein creía que dado el marco de una teoría completa apropiada de los fenómenos cuánticos, debería ser posible tratar los objetos con propiedades definidas, independientes del observador, en todo tiempo... [Einstein creía] en el argumento pitagórico de que la verdad es independiente de los seres humanos". (Home, p.361-362)

Desde la iniciativa realista de Einstein, pionera en el ámbito de la física cuántica, muchos otros autores han intentado adoptar interpretaciones realistas de la teoría: la interpretación determinista de Bohm, la interpretación por ensambles de Ballentine, etc. Tales interpretaciones, si bien muy diferentes entre sí en cuanto a su postura respecto a la causalidad, conciben la mecánica cuántica como una descripción objetiva de lo real, en la cual la conciencia de los observadores no juega ningún papel y los aparatos de medición son también sistemas cuánticos que interactúan con el sistema microscópico a medir respetando las leyes de la teoría. Precisamente a esta familia de interpretaciones realistas pertenece la EDEL.

■ 2.6.4 MATIZANDO...

Hasta aquí hemos presentado las características más importantes de las posturas ortodoxa y realista, en general encarnadas en Bohr y Einstein, como claramente extremas y opuestas. Sin embargo, para hacer justicia a estos científicos, es necesario mencionar un par de matices.

El primer matiz se refiere a la influencia positivista sobre los autores que se alejaron del realismo al adoptar la perspectiva ortodoxa: Bohr y Heisenberg privilegiaron la descripción sobre la explicación, pero aún así, como bien lo indica Juan Arana en su artículo *Causalidad y*

Objetividad, no podemos calificar a Bohr de pragmatista, pues este físico creía que había **aspectos de las teorías que no eran revisables** en el futuro y que **los conceptos de la física clásica siempre serían necesarios**, dos ideas que crean tensión con un pragmatismo fuerte.

El segundo matiz es sobre la posición realista de Einstein quien, si bien quería mantener la independencia entre el sistema y el observador, también tomaba en cuenta la carga teórica y sostenía que en última instancia los objetos físicos adquieren significado en función de nuestras impresiones. Einstein defendía un realismo sofisticado, con algo de "realismo interno" lo que, desde mi punto de vista, enriquece y fortalece su posición al tomar en cuenta las limitaciones de los científicos como agentes epistémicos. Cabe mencionar también, que al principio las aseveraciones de Einstein eran de un realismo muy ingenuo, y conforme fueron pasando los años su postura filosófica se fue sofisticando.

En el artículo "*Física y Realidad*" de 1936, Einstein presenta su visión de la ciencia: expone un modelo de estratificación del sistema conceptual científico y de la metodología a seguir cuando se construye y se justifica una teoría científica. Para él, el objetivo principal de la ciencia es comprender de la manera más completa posible el conjunto de nuestras experiencias sensibles, utilizando la menor cantidad de conceptos y buscando una unidad lógica.

ESTRATIFICACIÓN DE LA CIENCIA

El primer estrato del conocimiento científico es el del conocimiento cotidiano; allí están los **conceptos primarios** que se relacionan directamente con la experiencia sensible y no tienen unidad lógica aún. En el segundo estrato sí se pretende alcanzar la unidad lógica y para ello se crean sistemas que proponen teoremas y otras relaciones entre los elementos del primer estrato, pero utilizando menos conceptos esta vez. Este proceso continúa estrato por estrato, alcanzando cada vez mayor **simplicidad** y mayor **unidad lógica** con una menor cantidad de conceptos, hasta llegar a las Leyes de la Naturaleza.

Los estratos intermedios son temporales, pueden desaparecer si son irrelevantes. Los estratos de mayor unificación representan un grado mayor de progreso en la ciencia. La justificación científica radica en probar la utilidad de los teoremas sobre los hechos de la experiencia

sensible y el éxito de cada estrato será el que defina si permanece o no en la estructura.

Como ejemplo Einstein menciona la mecánica clásica, cuyas nociones coinciden mucho con nuestro pensamiento cotidiano, pero no es suficiente para fundamentar toda la física. Para ese fin es necesaria una teoría de un estrato superior, que tenga un carácter más global, aunque tal vez no sea tan cercana a la experiencia sensorial. Einstein aclara que la teoría cuántica no puede cumplir este papel fundamental por ser una teoría incompleta, que lleva a contradicciones al tratar de describir un evento individual y que incluye conceptos que son inadmisibles para la teoría de la relatividad. Él creía que las dificultades entre ambas teorías quedarían resueltas con una nueva teoría de campo que incluyera a las dos. Pero advierte que "debemos preparar nuestra mente para aceptar el hecho de que las bases lógicas se apartan cada vez más de los hechos de la experiencia, y que el camino [desde las leyes fundamentales, hasta los teoremas y los conceptos relacionados con las experiencias sensibles] resulta continuamente más duro y más largo." (Einstein, "Física y realidad", 1936)

ONTOLOGÍA EN LAS TEORÍAS CIENTÍFICAS

En ese mismo artículo de 1936, Einstein pone especial cuidado al definir cómo se forma el concepto de "**objeto físico**" (que servirá después para constituir conceptos primarios) y es aquí donde podemos ver claramente el rasgo interno, a veces calificado de neo-kantiano, de su posición realista:

El concepto de "mundo externo real" en nuestro pensamiento cotidiano descansa exclusivamente en las impresiones de los sentidos... La diferenciación entre impresiones de nuestros sentidos y su representación no es posible; al menos no con certeza absoluta... El primer paso en el establecimiento de "un mundo externo real" es la formación del concepto de objeto físico...Se atribuye el significado de objeto físico a la multitud de experiencias sensoriales... El concepto de objeto físico debe su significado y justificación a la totalidad de las impresiones sensoriales; esto es lo que debemos entender cuando se habla de "**la existencia real**" de un objeto físico...Los conceptos y relaciones entre ellos parecen más fuertes e inalterables que la experiencia sensorial misma...**Que estos conceptos no puedan ser el resultado de una ilusión o alucinación jamás está absolutamente garantizado...**Sólo el éxito de los resultados es el factor determinante...La totalidad de las conexiones...es lo único que distingue la gran construcción que es la ciencia de un esquema

de conceptos lógicos vacíos. (Einstein, Física y Realidad, 1936, negritas mías)

Como Antonio Diéguez Lucena explica en su artículo *Los compromisos del realismo científico*, se puede desglosar al realismo científico en (al menos) cuatro tesis: el realismo ontológico, el epistemológico, el teórico y el semántico, y estas cuatro tesis no tienen por qué ser aceptadas conjuntamente, de hecho, comenta, sólo realistas tan fuertes como Mario Bunge lo hacen. Muchos realistas sostienen sólo un par y si sostienen más lo hacen de un modo moderado.

En estos términos podemos concluir nuestro segundo matiz aclarando que, si bien hasta ahora habíamos visto en Einstein un realismo ontológico externalista, en la cita anterior parece suavizar su postura y acercarla más al internalismo: en ella, Einstein sostiene que los "objetos físicos" que sustentan a las teorías están constituidos por nuestras impresiones sensoriales y a eso le llama "ser real". Sin embargo, mantiene su compromiso ontológico con la existencia del mundo independiente cuando acepta que tales impresiones sensoriales pueden ser erróneas, y que por lo tanto, las teorías pueden referirse (indeseablemente, claro) a entidades que no son reales.



Capítulo 3. ELECTRODINÁMICA ESTOCÁSTICA LINEAL



3.1 BASES Y ANTECEDENTES



3.1.1 ¿QUÉ ES UN PROCESO ESTOCÁSTICO?

Los procesos estocásticos son aquellos que se deben a la acción de **causas** muy complejas e impredecibles. Dos ejemplos ilustrativos de procesos estocásticos son el número de personas en la fila de una taquilla del metro (cuando está abierto, claro), o una mota de polvo flotando en el aire. En el primer ejemplo no podemos predecir el número de personas en la fila para cada momento y en el segundo no podemos predecir los lugares exactos por los que pasará la mota de polvo, pero en ambos casos hay regularidades estadísticas y se sabe perfectamente cuáles son los factores a los que se deben los resultados (horarios de escuelas y trabajos, población de la ciudad que no cuenta con automóvil, en el caso del polvo la gravedad, el movimiento de las moléculas de aire, etc.). Aquí podemos ver de nuevo la diferencia entre el indeterminismo y la causalidad: el indeterminismo se presenta en los procesos estocásticos, pero esto no implica que su causalidad se ponga en duda.

Esta caracterización de "estocástico" implica indeterminismo (o impredecibilidad) en la descripción del proceso, pero supone que el proceso mismo es causal¹. En este capítulo utilizaremos los términos "aleatorio" y "azar" en ese mismo sentido de "impredecible en su descripción, pero causal en un nivel subyacente".



3.1.2 ¿CÓMO SURGE LA ELECTRODINÁMICA ESTOCÁSTICA LINEAL?

La Electrodinámica estocástica lineal (EDEL) es una teoría que surgió a partir de algunas modificaciones y correcciones que Luis de la Peña y Ana María Cetto hicieron a la Electrodinámica estocástica² (EDE) propuesta por los mismos autores y por varios otros. Ambas teorías coinciden en su intención de rescatar la causalidad, en que son realistas y en otros puntos esenciales que resaltaremos a continuación.

EDE y EDEL están de acuerdo en que el comportamiento cuántico de las partículas es un resultado de su interacción con el campo de radiación de vacío o campo de punto cero. Se asume que este campo **real** abarca todo el

¹ De la Peña y Cetto aceptan abiertamente este compromiso realista causal. La imposibilidad de hacer predicciones es técnica, no filosófica.

² La EDEL es un enfoque lineal y no perturbativo de la EDE.

espacio y su acción sobre la partícula imprime un movimiento estocástico permanente en todos los puntos del espacio.

De la Peña y Cetto, en su artículo titulado "*Teoría Estocástica para sistemas mecánicos clásicos y cuánticos*" de 1975, afirman que la teoría EDE "está en total acuerdo con la llamada interpretación estadística de la mecánica cuántica que fue defendida por Einstein y que sigue siendo tan poco popular entre los físicos; [la **EDE**] es una teoría de variables ocultas". (Cetto y de la Peña citados por Home y Whitaker, 1991, p.263).

Aquí es conveniente aclarar que los autores aceptan la clasificación de su teoría como una "**interpretación de ensamble y de variables ocultas**" cuando se les pide que la definan en términos usuales (u ortodoxos). Pero varias veces en sus artículos son explícitos respecto a su total acuerdo con Einstein en dos aspectos fundamentales que los distinguen de las demás interpretaciones de variables ocultas; esto es válido tanto para la EDE como para la EDEL:

1) Por un lado los autores comparten con Einstein el interés por construir una teoría más fundamental, a partir de la cual se obtenga (como aproximación) la mecánica cuántica

2) Y por el otro lado comparten con Einstein las críticas a la interpretación de Bohm, esto es, están de acuerdo en que tan solo agregar variables al formalismo cuántico conocido, como es usual suponer en una teoría de variables ocultas³, no dará muchos frutos en la resolución de problemas conceptuales de la mecánica cuántica como son la recuperación del realismo o del determinismo.

Así como los realistas afirman que sería un milagro obtener todos los resultados de la ciencia sin un mundo real subyacente, De la Peña y Cetto afirman que diversos fenómenos característicos de la mecánica cuántica encontraron en la EDE una explicación física consistente. Entre esos fenómenos mencionan los efectos de cavidad en sistemas atómicos, efectos térmicos de aceleración, el oscilador armónico y varios otros. En 1980 Brody y de la Peña (y otros autores con otros métodos) obtuvieron la **distribución de Planck** dentro del marco de la EDE; Por eso dice de la Peña

³ Con "las variables ocultas de la interpretación de Bohm", nos estamos refiriendo a todo lo que Bohm agregó a la mecánica cuántica, incluyendo su ecuación para su "campo cuántico guía", que ha sido tan criticado, entre otras cosas, porque sus efectos no cambian al aumentar o disminuir la intensidad del campo.

que es "difícil creer que todos los resultados satisfactorios obtenidos, cuantitativos y cualitativos, son meros accidentes" (Cetto y de la Peña, 1982).

■ 3.1.3 ANTECEDENTES

Como vimos en la introducción a este trabajo, desde los primeros años del siglo XX Nernst enfatizó el rol crucial de la interacción entre materia y vacío para la estabilidad del átomo, que es un resultado fundamental de EDE. Sin embargo, las ideas básicas de la EDE surgieron en los 1950's (Kalitsin, 1953; Adirovich y Podgorietzki, 1954; Braffort, 1954; Sokolov y Tumanov, 1957) y el desarrollo central fue el del trabajo de Marshall en 1963, que fue seguido por varios investigadores como Braffort, Santos, Claverie, De la Peña y Cetto.

La idea original de Nernst sobre el campo de fondo era muy intuitiva, por eso se retomó frecuentemente, adquiriendo cada vez más fuerza y apoyo experimental: "Se considera ampliamente que varios fenómenos son causados por la interacción de la materia con el campo de punto cero. Algunos de los más frecuentes son las fuerzas de van der Waals y las de Casimir entre cuerpos macroscópicos"⁴ (Cetto y de la Peña, Quantum Dice, p.101). Estos resultados teóricos y experimentales son bien conocidos y aceptados, incluso por físicos ortodoxos. La diferencia es que los autores de la EDEL consideran que el campo de fondo es fundamental para explicar los fenómenos cuánticos, mientras que los ortodoxos a lo sumo lo mencionan como un campo virtual o formal.

■ 3.1.4 OTRAS TEORÍAS ESTOCÁSTICAS

Jammer dedica una sección de su libro sobre los fundamentos de la mecánica cuántica a las teorías estocásticas. Entre las teorías estocásticas tempranas Jammer considera la de Fényes (1952) como "el primer intento serio para interpretar a la mecánica cuántica como una teoría... **inherentemente estocástica**" (Jammer, p.425)

Nicholson criticó a Fényes por utilizar un formalismo matemático *ad hoc*, cuyas soluciones no estaba claro que fueran equivalentes a las de la ecuación de Schrödinger como Fényes afirmaba. Weizel también criticó la teoría de Fényes y propuso una alternativa, mucho más cercana a la teoría causal de Bohm.⁵

⁴ En el apéndice 5 se explica con detalle el efecto Casimir.

⁵ Bopp y Darzeff son otros dos físicos que hicieron propuestas estocásticas en los 50's. (Para más detalles ver Jammer, p.425-433)

Dentro de las teorías estocásticas posteriores, Jammer menciona las de David Kershaw, G.G. Comisar y a la EDE. Lo importante de todos estos desarrollos teóricos para el tema que nos ocupa, es que sacaron a la luz varias similitudes entre los **sistemas clásicos estocásticos** y los **sistemas cuánticos**. Por ejemplo, David Kershaw mostró que "las soluciones estacionarias de la ecuación de Schrödinger son precisamente las distribuciones de probabilidad estacionarias de los movimientos de los sistemas considerados como cadenas de Markov." (Jammer, p.431) Luis de la Peña y Cetto, por su parte, derivaron la ecuación de Schrödinger a partir de consideraciones estadísticas estocásticas: "En 1969 con A.M. Cetto, Luis de la Peña mostró, partiendo del principio generalizado de D'Alembert, que uno puede expresar las ecuaciones básicas de la teoría estocástica desarrollada previamente en forma Lagrangiana y así derivar la ecuación de Schrödinger para una partícula en un campo electromagnético de generalidad restringida." (Jammer, p.433)

Es importante aclarar que hay una diferencia esencial entre la propuesta de Cetto y de la Peña y las demás teorías estocásticas que menciona Jammer:

La EDE y la EDEL, no ven a la mecánica cuántica como un caso particular de la clásica, ni intentan, como otras interpretaciones estocásticas, ver a la mecánica cuántica como un caso análogo al del movimiento browniano⁶. Más bien proponen dar un marco más general, a partir del cual pueden analizarse tanto el movimiento browniano como los sistemas cuánticos, dependiendo de las aproximaciones que se tomen en cuenta y aceptando que son procesos de naturaleza esencialmente distinta: "el electrón sigue una trayectoria estocástica que recuerda ampliamente a la del movimiento browniano, pero al mismo tiempo difiere esencialmente de ella, debido a la naturaleza enteramente diferente del fondo en el que los electrones y las partículas brownianas se mueven". (Cetto y de la Peña, 1977)

Esto es, a pesar de notar la similitud entre procesos estocásticos clásicos y procesos cuánticos, la EDE marca una distinción clara entre ellos. Cetto y de la Peña prefieren hablar de la mecánica cuántica como un proceso estocástico en sí, más que hacer una analogía entre esta teoría y los procesos estocásticos clásicos. (Más detalles en Quantum Dice, p.49)

⁶ El movimiento browniano es llamado así en honor a Brown, quien descubrió por primera vez este movimiento en una suspensión de granos de polen.



3.2 PROPUESTA ACTUAL: ELECTRODINÁMICA ESTOCÁSTICA LINEAL

Como hemos venido mencionando, la premisa principal de la EDEL es que el espacio está ocupado por el campo de punto cero, más precisamente, "por una colección de campos aleatorios de punto cero, que juntos constituyen el vacío físico... [Y propone que] la componente electromagnética de todos esos vacíos, el campo de radiación de punto cero, es especialmente relevante para entender la física atómica y la física cuántica" (Cetto y de la Peña, Quantum Dice, p.99). Si bien los autores aceptan que todos los campos de vacío pueden contribuir al comportamiento estocástico de la materia, consideran que para los fenómenos atómicos, que son de naturaleza básicamente electromagnética, es razonable asumir que el campo electromagnético es el que tiene la responsabilidad central del comportamiento cuántico (para más detalles ver Quantum Dice, P.65). Así, el objetivo de la EDEL es analizar en qué medida se pueden entender las propiedades cuánticas como consecuencia de la interacción entre la materia y el campo de radiación de punto cero.

En la EDEL Cetto y de la Peña muestran que el formalismo cuántico puede derivarse de una teoría más fundamental que la mecánica cuántica. Para ellos la "EDEL es la forma natural del formalismo cuántico pidiéndole a sus soluciones que sean compatibles con un número limitado de principios [3], cada uno con un significado físico claro" (Cetto y de la Peña, 2005, p.1)

En su artículo más reciente (2005) Cetto y de la Peña aclaran que no pretenden hacer una **derivación completa** de la mecánica cuántica, si no "proveer los elementos fundamentales que explican de dónde viene el formalismo de la teoría cuántica. La naturaleza de la EDEL [afirman] nos permite ir más allá del marco de la teoría cuántica del presente.... [y] aplicar los principios de la teoría [EDEL] para entender la física de nuestros días." (Cetto y de la Peña, 2005, p.2)

A continuación presentamos los tres principios centrales de la EDEL a los que se refieren los autores. No vamos a tratar con detalle su significado físico, pero vale la pena tenerlos presentes antes de concentrarnos en las respuestas que la EDEL ofrece ante los problemas conceptuales de la teoría cuántica.

Principio 1) El sistema estudiado alcanza un estado de equilibrio, en el cual el valor promedio de la potencia radiada por la partícula, iguala el valor promedio de la potencia absorbida por ella del campo.

Cuando se satisface la condición de equilibrio del principio 1 (**P1**), se dice que el sistema ha alcanzado el régimen cuántico.

Principio 2) Una vez que se alcanza el régimen cuántico el campo de vacío ha tomado el control sobre el movimiento de la parte material del sistema.

Principio 3) Existen estados (cuánticos) de la materia que son básicamente independientes de la realización del campo de vacío⁷.

3.2.1 ¿LA EDEL ES CLÁSICA O CUÁNTICA?

La EDEL puede considerarse clásica en el sentido de que trata con fenómenos susceptibles de ser descritos en un espacio y tiempo continuos. Sin embargo, como apunta Luis de la Peña, el simple hecho de que la constante de Planck \hbar y la incertidumbre jueguen un papel central en la teoría, es suficiente para que la consideremos una teoría cuántica: El campo de fondo es un elemento que no aparece en la física clásica y su energía está dada en términos de \hbar .

Ahora bien, esto no quiere decir que la EDEL considere de entrada que el campo de fondo está cuantizado, como fue propuesto por otros autores. Esto implicaría caer en una especie de petición de principio, pues se intentarían explicar las propiedades cuánticas de la materia, partiendo (tramposamente) de un campo ya cuantizado. La EDEL parte por esta razón de la existencia del campo de fondo, sin decir nada acerca de su cuantización, esperando que esta surja de manera natural al estudiar la interacción entre el campo y la materia.



3.3 RESPUESTA DE LA EDEL A LOS PROBLEMAS CONCEPTUALES DE LA DESCRIPCIÓN CUÁNTICA

Cetto y de la Peña proponen adherir la EDEL a las interpretaciones estadísticas o de ensamble⁸. Como ellos mismos explican, una sola partícula casi nunca satisface **P1**, **P2** y **P3**, pero “una colección

⁷ Por la naturaleza estocástica del campo, cada vez que realicemos un experimento estaremos trabajando con un campo nuevo y distinto. Esto es lo que se quiere decir con “una realización del campo”.

⁸ En el apéndice 4 se muestra la diferencia entre la interpretación de ensamble y la interpretación ortodoxa con un par de ejemplos ilustrados sencillos.

suficientemente grande de sistemas preparados similarmente puede satisfacerlos estadísticamente.” (Cetto y de la Peña, 2005, p.26). Como veremos, esto les permite dar respuesta a algunos de los problemas que planteamos en los capítulos 1 y 2.

3.3.1 CUANTIZACIÓN

En la EDEL, la cuantización es un resultado que surge cuando se realizan las soluciones más insensibles ante las fluctuaciones del campo de fondo, [esto es, “las que son inmunes a cambios pequeños en la realización particular del campo de vacío, una vez que el sistema ha entrado en el régimen cuántico”. (Cetto y de la Peña, 2005, p.22-23)] Tras la selección, se obtienen precisamente las soluciones cuánticas permitidas. Por un lado que el principio **P1** nos dice que en el régimen cuántico la energía debe estar balanceada y por el otro lado el principio **P3** nos dice que las funciones de respuesta deben ser independientes respecto a cada realización del campo. Como explican los autores, “es el mutuo reforzamiento de estos dos requerimientos lo que da lugar a la selección de una clase bien definida de soluciones estacionarias permitidas, y así a la cuantización”. (Cetto y de la Peña, 2005, p.23-24) Esta es la explicación que la EDEL ofrece respecto al origen de la cuantización, que se aplica a casos como el de la estabilidad atómica y que claramente no puede darse en la interpretación ortodoxa estándar, porque esta última no alude al campo de fondo cuando explica los fenómenos cuánticos.

3.3.2 INDETERMINISMO Y CAUSALIDAD

La EDE fue una teoría que, en palabras de Luis de la Peña, “tenía como propósito fundamental **darle un sentido físico al indeterminismo cuántico** e incluso... **recuperar la causalidad** al tratarlo como generado por una fuerza estocástica” (De la Peña, 2005, p.4, negritas mías). Según el análisis de Home, en la EDE la **causalidad** está relacionada con la noción de **computabilidad** y las relaciones causales provienen de ecuaciones similares a las de la física clásica⁹. Igual que la EDE, la EDEL está enfocada a la recuperación de la causalidad.

¿QUÉ DICE LA EDEL RESPECTO A LAS TRAYECTORIAS?

⁹ Más específicamente “proviene de ecuaciones de campo maxwellianas que conectan valores variables del campo en puntos del espacio y del tiempo diferentes.” (Home, 1997, p.331)

Cetto y de la Peña afirman que "desde que el régimen cuántico es alcanzado y [P3] se sostiene, **resulta imposible trazar hacia atrás la trayectoria seguida por una partícula dada** que alcanzó el estado estacionario. En este sentido, la descripción se hace independiente de las condiciones iniciales y se refiere sólo a subensambles, i.e., al conjunto de aquellas partículas que alcanzaron el estado final." (Cetto y de la Peña, 2005, p.24, negritas mías)

Entonces cabe preguntarnos: **¿Idealmente la EDEL querría erradicar la naturaleza estadística para rescatar trayectorias individuales?** Y la respuesta es que **no**: idealmente la EDEL quisiera obtener el mayor detalle posible, pero sus autores no pretenden recuperar las trayectorias individuales de las partículas y aceptan que esta información individual no puede obtenerse debido a la naturaleza estocástica del campo de fondo. Los resultados serán estadísticos, pero esta naturaleza estadística no es mágica ni problemática, es similar a lo que sucede en la ley de los gases o en cualquiera de las teorías estadísticas clásicas establecidas. Cetto y de la Peña reconocen que "la única manera sensible de seguir las trayectorias reales [sería] volver a la ecuación original de movimiento, pero incluso así [se tendría] el problema intrínseco de cualquier descripción estocástica, a saber, que la realización específica del campo es desconocida y con ella la trayectoria específica." (Cetto y de la Peña, 2005, p.25)

Notamos entonces que en este aspecto particular la visión de los autores de la EDEL es distinta a la de Bohm, a la visión de Einstein y también a la interpretación ortodoxa: no se buscan trayectorias en la mecánica cuántica, no se pretende describir las trayectorias individuales, ni se desea junto con Einstein quitar todos los elementos estadísticos de la descripción cuántica, pero tampoco se llega al extremo ortodoxo de decir que "las trayectorias no existen" o que "no tiene sentido hablar de ellas".

En la EDEL las trayectorias existen, sólo que no podemos conocerlas y por eso no pertenecen a la descripción final del sistema cuántico.

DE LAS TRAYECTORIAS AL PROBLEMA DE LA CAUSALIDAD Y EL INDETERMINISMO

Cetto y de la Peña **no** están a favor de la interpretación de variables ocultas de Bohm como rescate de la causalidad y comentan que, "incluso si uno intenta completar la teoría adicionando el campo de fondo, la trayectoria de una partícula específica permanece indeterminada; esto

simplemente significa que **una descripción indeterminista del sistema cuántico es inevitable.**" (Cetto y de la Peña, 2005, p.26)

Esta cita es sumamente importante para comprender que la EDEL **no pretende recuperar el determinismo** en la mecánica cuántica. Para Cetto y de la Peña la mecánica cuántica es una teoría en la que el indeterminismo respecto a las partículas individuales no puede ser removido, **pero sí** quieren **recuperar la causalidad**. Para ilustrar esto veamos la siguiente cita:

La ausencia de trayectorias [en la descripción cuántica final] es un obstáculo serio en la descripción de eventos rápidos, como lo es la transición entre estados, los "saltos cuánticos". De acuerdo con la EDEL, las transiciones ocurren debido a las interacciones resonantes con el campo de fondo [i.e, **las transiciones tienen una causa**]. Dado el estado atómico del electrón, hay un conjunto de frecuencias resonantes a las cuales puede responder. [**Sin embargo, hay indeterminismo respecto a la transición específica:**]Cuál de ellas será seleccionada en cada ocasión es materia del azar, pero no hay adivinación de parte del electrón. Por supuesto, "azar" se está entendiendo aquí en el sentido de que el resultado final depende, entre otras cosas, de la realización específica del campo de vacío estocástico, sobre el cual no tenemos control. (Cetto y de la Peña, 2005, p.25)¹⁰

Para los autores, una teoría que satisface el principio **P3** da en una forma natural una representación estadística. Pero enfatizan nuevamente que el hecho de que la representación sea estadística "**no significa que la partícula tenga un comportamiento acausal**: la teoría completa [EDEL] es causal y realista" (Cetto y de la Peña, 2005, p.26, negritas mías) En nuestros términos, la EDEL defiende el **realismo externo**, en el que los objetos están constituidos independientemente del observador. No cumple la **computabilidad**, porque no podemos conocer las trayectorias en todo momento, pero sí cumple la **causalidad** y no respecto a ψ si no en un sentido más fuerte, pues conocemos las causas "reales" de los fenómenos. En gran parte de los casos las causas (campo) y los efectos coexisten en el tiempo, por lo tanto no podemos hablar de **causalidad retardada**, a menos que argumentemos, como lo hace De la Peña, que el campo después de interactuar con la partícula no es exactamente el mismo.

¹⁰En las transiciones no se cumple el P3, sólo se cumple cuando los electrones están en estados estacionarios o cuando hay equilibrio.

3.3.3 MEDICIÓN O COLAPSO

Como vimos, según la interpretación ortodoxa, durante la medición los términos de interferencia son eliminados y el estado del sistema "**se reduce**" a una salida individual. Desde el punto de vista de la EDEL, el hecho de que esta reducción no sea descrita por la ecuación de Schrödinger, implica una violación de las reglas cuánticas de la evolución (causal)¹¹.

Esto es, la ecuación de Schrödinger, junto con la información que nos da sobre la evolución del sistema, es clara, causal y esto es parte del suelo común que aceptan todos los físicos. Lo que disgusta a los autores de la EDEL es que, para dar cuenta de lo que sucede durante la medición, se haya introducido al formalismo cuántico el postulado de la reducción (o del colapso), un postulado que no cumple para nada con las características de claridad y causalidad de la ecuación de Schrödinger.

De hecho, Cetto y de la Peña consideran que la introducción del postulado de la reducción al formalismo cuántico es lo que ha provocado, de manera inconveniente, que la medición tenga un papel esencial en la mecánica cuántica. Como podemos notar en la siguiente cita, para ellos la medición debería tener un papel mucho más secundario y no uno protagónico como el que le asignaba Bohr y le siguen asignando quienes defienden una interpretación ortodoxa:

"La teoría de la medición está lejos de ser fundamental; se refiere a cuestiones metodológicas relacionadas a nuestras observaciones y conocimiento del mundo, **no al mundo mismo**, y su introducción transforma la teoría fundamental en una sobre las relaciones entre el observador y el mundo"(Quantum Dice, p.27, negritas mías)

Los autores de la EDEL hacen notar que en la literatura (y la práctica científica), el término "**colapso**" algunas veces se utiliza para referirse a procesos físicos producidos por interacciones físicas¹² y en otras ocasiones se refiere más bien a efectos de no localidad o acausalidad¹³. "Desafortunadamente, [comentan] estos dos tipos de colapso

¹¹ Para más detalles ver Quantum Dice, p.27.

¹² Por ejemplo, cuando fotones de un estado ligado pasan por un polarizador, algunos son absorbidos y aquellos que pasan cambian a un estado polarizado (reducido). En estos casos, el aparato de medición afecta al microsistema y destruye la coherencia de las amplitudes superpuestas. (QD, p.28)

¹³ "la medición realizada en una partícula colapsa la Ψ de su pareja lejana" (Quantum Dice, p.28)

suelen confundirse, lo cual se suma a la ya de por sí confusa situación” (Quantum Dice, p.28)

En breve, la postura de la EDEL ante la paradoja de la medición, se parece a la de Einstein en tanto que reprueba y pone en cuestión al postulado del colapso.

3.3.4 EL PAPEL DEL OBSERVADOR

A diferencia de otras interpretaciones, la EDEL considera particularmente indeseable el que se incluya al observador o al aparato de medición en la descripción cuántica: incluirlos implica una inconsistencia lógica, una regresión infinita en la que observador y observado se afectan mutuamente sin saber cuándo debemos detenernos, dado que el aparato y el observador están formados por átomos también. Para evitar esta regresión, comenta de la Peña, puede argumentarse que el aparato (o el científico) se comporta cuánticamente, pero esto nos llevaría a la consecuencia igualmente desagradable, de que la teoría cuántica sólo estaría siendo válida para una parte del sistema y no para el sistema en su totalidad. (Más detalles en Quantum Dice, p.27).

Una de las paradojas que resuelve la EDEL al adherirse a las interpretaciones de ensamble es precisamente la que se refiere al papel del observador en el momento de la medición. Desde el punto de vista de Cetto y de la Peña la mecánica cuántica en tanto teoría fundamental no debería necesitar del observador externo y la interpretación de ensamble “permite remover la necesidad del observador...porque diferentes resultados en una serie de mediciones sobre un mismo ensamble son el resultado directo de medir en diferentes miembros del ensamble” (Cetto y de la Peña, 2005, p.26) y no de la intervención de quien está midiendo.

EL EXPERIMENTO DE LA DOBLE RANURA

En la sección 2.3 expusimos el problema conceptual planteado a la mecánica cuántica a partir del experimento de la doble ranura. Si recordamos, la pregunta era ¿cómo “sabe” el electrón que están abiertas las dos ranuras (y no sólo una de ellas), para comportarse de manera distinta?

En la respuesta **cualitativa** que ofrece la **EDEL** a esta pregunta (la respuesta **cuantitativa** es una tarea abierta, dicen Cetto y de la Peña) la **causa** de que los electrones se comporten de una forma distinta cuando se abren las dos rendijas radica nuevamente en el campo de fondo: al modificar la estructura por la que van a pasar los electrones, cambia también la configuración del campo de fondo que la rodea y esto provoca que la información que llega a la pantalla, transportada por los electrones que ya interactuaron con el campo y con la rendija, sea diferente para el caso de la rendija doble y la rendija sencilla.¹⁴ Desde la EDEL, entonces, el electrón no necesita "saber" ni "adivinar" nada.

Al final del análisis que hace Feynmann de varios experimentos con doble ranura, menciona que el principio de incertidumbre de Heisenberg puede enunciarse en términos de estos experimentos de la siguiente manera: "Es imposible diseñar un aparato que determine la ranura por la que pasó el electrón, y que no perturbe a los electrones lo suficiente como para destruir el patrón de interferencia" (Feynman, p.15)

Aquí claramente Feynmann está relacionando el principio de incertidumbre con el dispositivo experimental. De igual manera, otras desigualdades del mismo tipo que la desigualdad del principio de incertidumbre de Heisenberg¹⁵ son interpretadas por algunos físicos como perturbaciones del sistema debidas a nuestra intervención durante las mediciones. Pero desde el punto de vista de la EDEL el indeterminismo de los sistemas cuánticos no tiene que ver con el proceso de medición, "no es resultado ni de las perturbaciones del sistema por nuestras observaciones ni debido a un indeterminismo intrínseco ontológico del electrón... como se asume usualmente. Este comportamiento es simplemente el resultado de que el electrón está en contacto constante con el campo" (Cetto y de la Peña, 2005, p.27)

¹⁴ "Cualquier cuerpo cercano modifica el campo de fondo si en la vecindad de una estructura periódica algunos componentes del campo que caen dentro de ella se incrementan en algunas direcciones preferenciales debido a la difracción y decrecen en otras. Bajo el conocimiento de que el electrón responde más fuertemente a las ondas relevantes del campo de punto cero, el efecto de difracción sobre la partícula reforzará las desviaciones angulares específicas de dichas ondas, dando así paso al patrón de interferencia" (Cetto y de la Peña, 2005, p.28).

¹⁵ Sea Δx la incerteza de la posición x y Δp la incerteza del momento p (donde $p = mv$, masa por velocidad), entonces existe una cota inferior para el producto, esto es $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$ (donde \hbar es la constante de Planck). Así, si conocemos con exactitud x , la incerteza de x es cero ($\Delta x = 0$) y por tanto la incerteza de la otra observable (Δp) se hace infinitamente grande.

También Fényes, el autor de una de las teorías estocásticas que mencionamos en los antecedentes, consideraba que las relaciones de Heisenberg no provienen de las perturbaciones hechas en las mediciones, sino de la naturaleza estocástica de los procesos cuánticos.¹⁶

3.3.5 DUALIDAD ONDA PARTÍCULA

Como vimos en la sección dedicada al principio de complementariedad de Bohr, desde una postura ortodoxa suele sostenerse que los corpúsculos cuánticos son "duales", esto es, que se comportan algunas veces como ondas y otras como partículas de manera mutuamente excluyente y complementaria.

El Dr. de la Peña considera que esta interpretación ortodoxa de la dualidad del corpúsculo cuántico se introdujo cuando se notó la incompatibilidad entre la idea de un electrón corpuscular al estilo clásico y las hipótesis ortodoxas de que la teoría cuántica es completa y la función de onda Ψ describe a un solo corpúsculo. Ahora bien, dice de la Peña, como la EDEL abandona esas hipótesis ortodoxas, no necesita de la interpretación dual:

"...si se abandona la pretensión de que la teoría actual es completa y se adopta la interpretación estadística, se hace posible entender el corpúsculo cuántico como una partícula; para algunos, al menos, esta noción es más clara, aunque evidentemente no debe llevarse al extremo pues no se trata de extrapolar las ideas y nociones clásicas a un terreno que les puede ser ajeno, sino simplemente, de no introducir en la teoría elementos innecesarios, confusos y no justificados adecuadamente por el experimento"¹⁷ (De la Peña, Introducción a la MQ, p.680)

Para los autores de la EDEL "la faceta ondulatoria" y "la faceta corpuscular" de la luz coexisten, están presentes en todo momento, como lo muestra la expresión que Einstein publicó (1905) en su artículo del efecto fotoeléctrico. Solamente que, bajo ciertas circunstancias, una se manifiesta más que la otra.

3.3.6 NO LOCALIDAD

¹⁶ Jammer comenta que Fényes dio soporte a su argumento presentando una derivación de la ecuación de Schrödinger a partir de un principio estocástico de Lagrange. (más detalles en Jammer, p.426)

¹⁷ El autor se está refiriendo aquí, por ejemplo, al principio de complementariedad.

La EDEL sostiene que la aparente no localidad, lejos de ser una propiedad real de los sistemas, es una consecuencia del formalismo cuántico usual y podemos encontrarla incluso en la física clásica¹⁸.

Si bien Cetto y de la Peña aceptan que la no localidad se presenta al trabajar con algunos sistemas cuánticos, ellos apuestan a que cada uno de estos fenómenos físicos tendrán más adelante una mejor explicación que la "explicación" ortodoxa actual. Piensan que la respuesta probablemente radica en analizarlos como fenómenos ondulatorios:

"Hay un elemento no local irreductible en la mecánica cuántica claramente exhibido en los experimentos de difracción, interferencia con electrones, neutrones y otras partículas... Por ejemplo, las propiedades observadas de todas las partículas entrantes al detector de un interferómetro pueden modificarse introduciendo cambios en el camino de uno sólo de los rayos que interfieren. Los fenómenos no locales de este tipo obviamente tienen que ver con el comportamiento del sistema cuántico, y entonces, sólo entendiendo la fuente del fenómeno ondulatorio uno puede esperar explicarlos sin recursos fenomenológicos *ad hoc*, como la auto interferencia y cosas por el estilo." (Quantum Dice, p.25)

Antes de concluir esta sección, debemos abordar un par de puntos de vital importancia para defender una posición local como lo hace la EDEL.

1) DESIGUALDADES DE BELL, LOCALIDAD Y REALISMO

En la sección 2.5, vimos que la violación experimental de la desigualdad de Bell, para muchos, significa que no pueden defenderse simultáneamente que la teoría cuántica es realista y que es local (como lo hace la EDEL). Ante esta situación Cetto y de la Peña argumentan que los experimentos en que se viola la desigualdad de Bell **no son concluyentes**, y por tanto, se puede seguir defendiendo una posición realista sin aceptar la no separabilidad o la no localidad.

Luis de la Peña sostiene que cada uno de los experimentos que violan la desigualdad de Bell, incluyendo los de Aspect, pueden interpretarse localmente, algunas veces analizando lo que sucede en el experimento como un **fenómeno ondulatorio**. No es de extrañarse, entonces, que los autores de la EDEL consideren pertinente dar la respuesta con este análisis ondulatorio a las otras "apariciones" de la no localidad.

2) NO LOCALIDAD EN EL FORMALISMO CUÁNTICO

¹⁸ "La física pre-relativista viola la localidad porque permite acciones a distancia, entre ellas la de la gravedad." (Quantum Dice, p.20)

Home (entre otros) apunta la importancia de que una teoría tome en cuenta la no localidad del formalismo cuántico cuando quiere utilizarlo y adquirir con él todo su apoyo empírico. Luis de la Peña y Ana María Cetto tienen muy claro este punto y aclaran que la localidad (y la causalidad) en la EDEL no se ven afectadas por la falta de estas características en la mecánica cuántica. ¿Cómo evitan que la no localidad del formalismo afecte a la EDEL? Lo que sucede es que los autores proponen a la EDEL como una teoría más fundamental que la teoría cuántica, a partir de la cual puede derivarse el formalismo cuántico. Explican que en esta derivación formal es en donde puede perderse algo de causalidad y localidad, pero esto sólo sucede una vez que el campo de fondo ya ha jugado su papel. En un primer momento se han explicado los fenómenos causal y localmente, y sólo en un segundo momento, cuando se ha alcanzado el régimen cuántico (esto es, cuando se cumple el principio P1), ya se han hecho aproximaciones en las que se deja de lado al campo de fondo y entonces se procede a utilizar el formalismo cuántico sin que éste nos esté diciendo cómo se comporta el mundo.

Cabe mencionar, además, que a partir de la EDEL se ha derivado la ecuación de Schrödinger y la ecuación de Planck, partes del formalismo cuántico que **no** están vinculadas a la no localidad como el postulado del colapso de la función de onda.

3.3.7 REALISMO

La EDEL defiende un realismo de tipo EPR, esto es, asume que las partículas cuánticas tienen un conjunto de propiedades objetivas reales y bien definidas, aún cuando no las conozcamos.

Además, la EDEL **asigna un estatus ontológico a las entidades con las que trata**. Desde el punto de vista de los autores de la EDEL, aunque las teorías científicas pueden estar equivocadas, en principio se refieren a **entidades reales**. En este sentido, la EDEL defiende una postura realista fuerte: el mundo externo ya estructurado existe, es independiente del observador y los científicos intentan describirlo con mayor o menor éxito, sin que su tarea afecte el estatus ontológico del mundo y sus entidades.

Cabe mencionar que, si bien este realismo ontológico no es muy común entre los filósofos de la ciencia, sí es una postura adoptada frecuentemente por los científicos... y que forma parte del sentido común de la mayoría de los humanos. Luis de la Peña comenta, por ejemplo, que a

pesar de las distintas imágenes del fotón que han estado en competencia (el fotón como un balón borroso, como una singularidad en el campo electromagnético, como un paquete de onda o como una mera descripción formal) actualmente se acepta de manera muy general que el **fotón** es una **entidad real**:

"Hoy en día nadie cuestionaría la realidad de las moléculas (incluso podemos "verlas" bajo el microscopio electrónico)... [y] parece que un proceso similar está tomando lugar con el fotón: la gran mayoría de los físicos le asignan un estatus ontológico, y sólo una pequeña, aunque no ignorable parte de ellos, lo consideran como mera heurística inventada para expresar eficientemente lo que el formalismo dice en su propio lenguaje eficiente, y persistir en su batalla a favor del continuo..." (Quantum Dice, p.57)

En resumen, la EDEL es una posición que busca la defensa consistente de la localidad, la causalidad y el realismo en la mecánica cuántica.



3.4 CRÍTICAS A LA EDEL Y RESPUESTAS

Cerraremos este capítulo mencionando algunas de las críticas que se le han hecho a la EDEL y cómo las responde.

Por un lado se cuestiona la existencia del campo de punto cero, ya que de ser real deberían observarse efectos electromagnéticos y gravitacionales de gran magnitud. Esta objeción era sostenida por Pauli y ha sido retomada por muchos físicos que prefieren considerar "virtual" al campo de punto cero.

La EDEL ofrece la siguiente respuesta a esta objeción:

"Una respuesta parcial... respecto a los efectos electromagnéticos es que no todos ellos pasan desapercibidos, si no que por el contrario, están siendo sistemáticamente observados en las propiedades cuánticas de la materia. Claro que esto no significa una observación directa del campo, pero sí una indirecta a través de sus efectos (como, tal vez, la estructura y estabilidad de los átomos, la naturaleza del espectro y fenómenos como las fuerzas de van der Waals u otras similares)". (Quantum Dice, p.101)

Es una respuesta "parcial" porque, si bien los autores de la EDEL consideran que la existencia del campo de fondo se manifiesta en las propiedades cuánticas de la materia, también aceptan que queda mucho por entender acerca de cómo el campo afecta a los mecanismos del microdominio.

Respecto a los efectos de gravitación, Luis de la Peña comenta que es posible que el campo de fondo no grave. Se cree, por ejemplo, que la aceleración de la expansión del universo puede deberse a una fuerza repulsiva que contrarresta la fuerza de gravedad y hay quienes atribuyen esto al campo de fondo. De cualquier forma, dar una respuesta clara a esto no es tarea de la EDEL sino de la cosmología.

Otra razón relacionada con la anterior para dudar de la existencia del campo de fondo es que cuando se calcula su energía se obtiene (indeseablemente) que es infinita. La aparición de esta energía infinita teórica del campo de fondo o campo de punto cero quizás representa la dificultad más importante para la EDEL, y más en el momento que se quiere defender su existencia real.

Luis de la Peña cree que la respuesta a este problema quizás se encuentre también en la cosmología. Pero por el momento, hay que admitir que ignoramos cómo dar cuenta de la energía del campo de punto cero, energía que sin duda debe ser finita. Los autores de la EDEL aceptan que este problema está abierto y notan que afecta tanto a su teoría, como a la electrodinámica cuántica, considerada como una de las teorías físicas más exactas y con mayor capacidad de predicción en la física.

Existe una salida práctica al problema de la energía infinita, que consiste en hacer un **corte de interacción** en la energía del campo: así como existen frecuencias del espectro electromagnético en que los rayos pueden atravesar cuerpos sin interferir con ellos (rayos X, por ejemplo), hay una frecuencia natural para la cual el campo de punto cero ya no interactúa con la materia. Si tomamos esa frecuencia como una cota superior, la integral con la fracción interactuante de la que se calcula la energía del campo de punto cero se vuelve convergente y nos da un valor finito.

Aunque está claro que esta salida no resuelve la dificultad de la infinitud de la energía total del campo, resulta útil para resolver varios problemas particulares de la física. Sólo se debe aclarar, cuando se recurre a este corte, que no se está hablando de la **energía intrínseca** del campo, sino de la **energía de interacción**.

Otra crítica a la EDEL, relacionada con lo anterior pero un poco distinta, es que defiende una posición realista y local tras la violación de la desigualdad de Bell, esto es, que insista en atribuir estatus ontológico y carácter separable a entidades que no podemos observar, cuyas

propiedades no podemos conocer completamente¹⁹ y que bien podrían ser, como el flogisto, entidades teóricas que "no existen", pero que son ficciones útiles para hacer predicciones. Recordemos que según los resultados de los experimentos donde se viola la desigualdad de Bell (como los de Aspect), no puede defenderse que los sistemas cuánticos son separables y aceptar simultáneamente una descripción realista, es decir, que la mecánica cuántica cumpla con el llamado realismo local.

Como hemos venido comentando, Cetto y de la Peña cuestionan la aclamada contundencia de los experimentos tipo Aspect y lo hacen porque consideran que la óptica estocástica²⁰ responde a los resultados de dichos experimentos, poniendo en entredicho su validez y todo lo que se ha derivado de ellos. Cetto y de la Peña simpatizan ampliamente con la visión de Emilio Santos de que **parece imposible demostrar empíricamente la invalidez de las desigualdades de Bell**. Emilio Santos explica que, al aumentar la sensibilidad de los detectores en los experimentos, aumenta el ruido y al disminuir el ruido se pierde sensibilidad, de tal suerte que los límites prácticos experimentales no permiten obtener resultados satisfactorios.

Respecto al hecho de que no puedan atribuirse todas las propiedades a un sistema cuántico en un momento dado, los autores de la EDEL opinan que esta imposibilidad se desprende directamente del formalismo cuántico, pero no tiene implicaciones ontológicas si adoptamos la interpretación de ensamble²¹.

Quisiera hacer notar que, tanto los que aceptan los resultados de los experimentos tipo Aspect, como los que cuestionan dichos resultados y prefieren defender una postura realista, tienen razones de peso a su favor. Cada uno considera que su visión es más consistente con el resto de las teorías científicas que conocen y aceptan y que va más acorde con los objetivos que buscan en su investigación científica. Cada uno encuentra mejores explicaciones con su visión y siente que responde mejor a los valores que consideran epistémicamente relevantes. Estamos entonces ante un claro ejemplo de **desacuerdo racional**.

¹⁹ Por ejemplo, según el principio de incertidumbre de Heisenberg no podemos saber la posición y el momento de una partícula simultáneamente.

²⁰ Rama de la electrodinámica estocástica enfocada a la zona óptica del espectro electromagnético.

²¹ Este punto será ampliamente desarrollado en el siguiente capítulo.

Existe otro grupo de críticas que se dirigen contra cualquier análisis estocástico de la mecánica cuántica.²² Como la EDEL hace una clara distinción entre los procesos estocásticos clásicos y los procesos estocásticos cuánticos algunas de esas críticas no le afectan, razón por la cual no las veremos con mucho detalle. Sin embargo, es pertinente aclarar la postura que tienen los autores de la EDEL respecto a los acercamientos estocásticos a la mecánica cuántica.

Para Cetto y de la Peña, la analogía entre la ecuación de Schrödinger y la ecuación de difusión (apéndice 6) constituye un argumento fuerte para apoyar la idea de que un proceso estocástico subyace a la mecánica cuántica. Pero, desde su punto de vista, "aunque la descripción estocástica de los sistemas cuánticos parece ser factible, una imagen correcta del micromundo ... requerirá un tratamiento más detallado de los procesos estocásticos subyacentes que el que ofrece la teoría [cuántica actual]"(Quantum Dice, p.50)

Podemos ver que, si bien los autores de la EDEL defienden un enfoque estocástico, también están conscientes de sus limitaciones y toman una actitud crítica hacia él: además de la no localidad que a veces aflora en la formulación estocástica de la mecánica cuántica, Cetto y de la Peña desaprueban que dicha formulación haya sido puramente fenomenológica, esto es, que haya sido construida buscando una descripción de los hechos, que se ajustara a los resultados de la mecánica cuántica, en vez de deducirlos a partir de primeros principios y comprobarlos después, como hace una teoría fundamental.

La EDEL, por el contrario, sí fue intencionalmente formulada como una teoría fundamental, con principios físicos claros y simples, a partir de los cuales se deduce el resto de la teoría, incluyendo aquellas predicciones que habrán de demostrarse empíricamente.

²² Entre ellas se encuentran las de Davidson Y Grabert (1979).



Capítulo 4.

¿QUÉ TAN RACIONAL ES LA DEFENSA DE LA EDEL?

En este capítulo intentaremos responder a la pregunta ¿qué tan racional¹ es la defensa de la EDEL frente a otras interpretaciones de la mecánica cuántica?

Para ello tomaremos en cuenta varios criterios generales sobre racionalidad en la ciencia y después analizaremos en detalle el problema de racionalidad y ontología que plantea Olimpia Lombardi en su artículo *Mecánica Cuántica: Ontología, Lenguaje y Racionalidad*. Finalmente, examinaremos la salida que ella sugiere para el problema, así como una salida alternativa que puede proponerse a partir de la EDEL.

En este análisis sobre la racionalidad en la EDEL es muy importante tener presente que la mecánica cuántica es una teoría subdeterminada en el sentido Duhem-Quine, esto es, que factores como la consistencia en su formalismo y el éxito de sus predicciones empíricas no son suficientes para determinar la estructura interpretativa². Además de éstos, la elección de una interpretación particular de la mecánica cuántica involucra otros factores como la coherencia, las preferencias ontológicas, o incluso factores que no son estrictamente epistémicos, como las actitudes que se desprenden de ciertas preferencias subjetivas, tales como los gustos y las emociones. En este escenario, es perfectamente posible que diferentes grupos de científicos sostengan de forma igualmente racional distintas interpretaciones de la mecánica cuántica.



4.1 CRITERIOS GENERALES DE RACIONALIDAD³

¹ En algunos contextos se asocia "racional" a características lógicas, algorítmicas, pero aquí utilizaremos "racional" como "tener buenas razones", esto es, como sinónimo de "razonable".

² La subdeterminación en el sentido Duhem-Quine también se conoce como la tesis de la subdeterminación de las teorías por los datos, según la cual, dada una teoría que da cuenta de un cuerpo de evidencia empírica, siempre es posible construir (en principio) otra que también dé cuenta de ese cuerpo de evidencia. Ésta tesis se aplica a todas las teorías científicas y no se refiere únicamente a la estructura interpretativa, incluso puede referirse a la parte formal de la teoría. Pero la EDEL y la mecánica cuántica estándar no son un ejemplo de teorías con formalismos completamente distintos: si bien no coinciden en todo, hay un área muy grande de intersección donde está, por ejemplo, la ecuación de Schrödinger.

³ Los criterios fueron tomados de artículos que escribieron recientemente (2005-2006) algunos filósofos de la ciencia cuando se les pidió que hicieran una

La EDEL cumple con varios criterios clásicos de racionalidad científica en tanto que:

(1) **Explica un gran número de hechos independientes** como resultado de la interacción entre el campo de fondo y las partículas subatómicas (la estabilidad atómica, el experimento de la doble rendija, la barrera de potencial, la cuantización de la energía, etc.)

(2) Sus autores han defendido la teoría **aún cuando ésta no coincide con las ideas de la comunidad en la que se desenvuelven**, lo cual no quiere decir que la EDEL no pueda corregirse o cambiarse:

(3) las **hipótesis** de la EDEL **son revisables y contrastables**⁴ y prueba de esto es que sus autores evolucionaron de la EDE a la EDEL frente a la aparición de un resultado experimental desfavorable contundente⁵.

(4) Además, la EDEL es una teoría **verosímil, coherente y con soporte empírico**⁶ en los experimentos que han detectado el campo de fondo.

Respecto al **soporte empírico** en tanto **poder predictivo**, podemos agregar que las predicciones de la mecánica cuántica están entre las más precisas que se pueden encontrar en la física y esta fuerza predictiva es heredada por la EDEL dado que el formalismo cuántico se deriva a partir de ella. Los ortodoxos, por otro lado, dirían que la EDEL **pierde soporte empírico** con los experimentos de Bell, ya que éstos fueron un parte-aguas en las discusiones sobre los fundamentos de la mecánica cuántica y pueden interpretarse como "contrastaciones empíricas no favorables" a la Popper, o "anomalías" a la Kuhn, para la EDEL.

Otro grupo de criterios de racionalidad se basan en la satisfacción de objetivos. Para Hempel (1979), por ejemplo, uno de los objetivos primordiales de la ciencia empírica es **"explicar los fenómenos del mundo de nuestra experiencia y responder no sólo a los ¿qué? sino también a los ¿por qué?"**⁷ La EDEL cumple con el objetivo de Hempel porque ofrece explicaciones concretas acerca del "por qué" de los fenómenos cuánticos,

reflexión sobre la racionalidad. La antología que reunirá los artículos con estas reflexiones se publicará próximamente bajo la edición de Ana Rosa Pérez Ransanz y Ambrosio Velasco en la universidad UNAM, México.

⁴ Los primeros tres criterios son de Jesús Mosterín, *La universalidad de la racionalidad científica*.

⁵ Experimento en Francia donde no se cumplieron las predicciones atómicas de la EDE.

⁶ Javier Echeverría, *Dos dogmas del racionalismo (y una propuesta alternativa)*.

⁷ Hempel citado por Hernán Miguel y Jorge Paruelo en *Explicación científica y elección racional entre teorías*, (p.1)

en las que busca la recuperación de la causalidad. Este tipo de explicaciones no las encontramos en otras interpretaciones que se enfocan más en la descripción de los fenómenos, esto es, se enfocan más en el "qué" que en el "por qué".

Para Popper, el objetivo último de la ciencia es la **búsqueda (interminable) de la verdad**; para Lakatos, **el progreso entendido como descubrimiento de nuevos hechos**; para los positivistas, **la creciente adecuación empírica y el incremento de la capacidad predictiva**; para Kuhn y Laudan, **la resolución de problemas**⁸. Aquí encontramos algunos objetivos con los que la EDEL no cumpliría. Por ejemplo, no se caracteriza por el descubrimiento de fenómenos nuevos, sino por explicar de una forma distinta los fenómenos ya conocidos por la ciencia actual y tampoco es claro que tenga mucho más capacidad predictiva que otras interpretaciones de la mecánica cuántica. Sin embargo, la EDEL cuenta con una gran fuerza heurística y también tiene la virtud de la fecundidad, ya que sugiere nuevas líneas de investigación, como el estudio de la relación entre la anti-gravitación y el campo de fondo. Y si estas líneas se desarrollan probablemente la EDEL lleve más adelante al descubrimiento de hechos nuevos y el cálculo de nuevas predicciones.

Es central destacar, además, que la EDEL tiene la particularidad de analizar los sistemas cuánticos como **sistemas abiertos**. Por mencionar un ejemplo, ya no se estudian los átomos como sistemas aislados, sino como sistemas inmersos en el campo de fondo. Este nuevo enfoque revela un **cambio fundamental en la ontología y en el objeto de estudio**, en la unidad de análisis, que distingue a la EDEL de las demás interpretaciones. Una consecuencia importante del análisis abierto de los sistemas cuánticos es que los fenómenos cuánticos, tales como el cambio de órbita de un electrón, ya no son vistos como "propiedades intrínsecas" de las partículas cuánticas, como sostiene la interpretación ortodoxa, sino que son producto de la interacción con el campo de fondo.

Este análisis esencialmente distinto, puede apuntar también hacia el descubrimiento de nuevos fenómenos cuánticos, que tal vez antes no se buscaban porque la unidad de análisis era otra.

Una reflexión más respecto a la racionalidad de la EDEL puede centrarse en cuestionar qué tan defendible es la idea explícita de sus

⁸ Javier Echeverría, *Dos dogmas del racionalismo (y una propuesta alternativa)*.

autores acerca de que una teoría física fundamental debe estar constituida por **primeros principios simples, elegantes y verdaderos**. Pero antes de decir por qué no coincido con la idea de Cetto y de la Peña acerca de las teorías físicas aclararé en qué sentido la sostienen⁹.

Para De la Peña no todas las teorías son elegantes y simples, estas son virtudes que sólo tienen las teorías fundamentales y aún así son *desiderata*, mas no reglas que siempre se cumplan. De la Peña considera además que una misma teoría puede ser terriblemente complicada o extremadamente simple, dependiendo del lenguaje en el que la expresemos. Ejemplo de esto es la teoría de la relatividad. Así, lo ideal es buscar el lenguaje en el que los principios y los cálculos tengan la mayor simplicidad y, en ese sentido, le den elegancia a la teoría.

Ahora bien, sin importar que las teorías sean fundamentales o no, desde el punto de vista de Luis de la Peña, todas deben basarse en principios verdaderos. De la Peña explica que el término "verdadero" se está utilizando aquí en el sentido de "factible" o "verosímil", de nuevo se está hablando de un objetivo que se desea alcanzar y que no siempre se logra. Cuando uno sostiene una teoría física, diría el autor, debe basarla en principios que considere verdaderos, en el sentido de que se aproximen lo mejor posible a la estructura de la naturaleza.

Aún cuando los autores de la EDEL mencionen estos valores como *desiderata*, difiero de su postura. Me parece que si nos estamos refiriendo a "verosímil", entonces podemos utilizar ese término y no hablar de "principios verdaderos". Además, el requisito de "principios simples y elegantes", incluso el mero requisito de que una teoría física esté construida sobre "principios" claros y sólidos a partir de los cuales puede derivarse lo demás, es cumplido por muy pocas teorías y, por lo tanto, considero que es un criterio demasiado fuerte, tan convencional como cualquier otro, para distinguir cuáles teorías son "fundamentales" y cuáles no.

Respecto a la verdad de los principios, de las hipótesis o de las teorías mismas, creo que coincido más con una postura como la de Bas van Fraassen, en que aceptar una teoría como correcta por su adecuación empírica aunada a otras virtudes epistémicas, no implica comprometerse con la verdad de la teoría. También me inclinaría junto con Van Fraassen

⁹ Este tema fue discutido con Luis de la Peña en conversaciones personales.

por una postura más mesurada respecto al realismo de las entidades teóricas.

La posición filosófica que Bas van Fraassen defiende, fue llamada por él mismo empirismo constructivo. Es constructivo porque para van Fraassen la ciencia es una actividad más de invención que de descubrimiento, y es empirismo porque según esa posición, "para servir a los propósitos de la ciencia, los postulados no necesitan ser verdaderos, excepto en lo que dicen acerca de lo que es efectivo y empíricamente comprobable."(V.F, 1941, p.18). Van Fraassen está a favor de la interpretación literal de las teorías, "una teoría no dice nada sobre las actitudes epistemológicas frente a las teorías ni de lo que se persigue con ellas... frecuentemente no es nada obvio cuándo un término se refiere a una entidad concreta o a una entidad matemática"(V. F, 1992, p.28)¹⁰

No obstante mi desacuerdo en estos aspectos con los autores de la EDEL, considero que su teoría tiene grandes virtudes. Creo, por ejemplo, que una de las contribuciones más importantes de la EDEL es el esfuerzo por **evitar la introducción a la mecánica cuántica de principios o explicaciones que no estén justificadas, ya sea por demostraciones matemáticas, por análisis físicos rigurosos, o directamente por los resultados empíricos**. Por poner un par de ejemplos, la EDEL no considera, ni menciona, ni incluye en momento alguno al observador ni al Principio de Complementariedad como parte de sus explicaciones. Sin poner en duda el papel fundamental que han tenido principios heurísticos como éste en la ciencia, sólo quisiera destacar que en una teoría con tantos problemas conceptuales por resolver como lo es la teoría cuántica, es muy admirable un intento como el de los autores de la EDEL por esclarecer el camino.

Creo que la interpretación de la mecánica cuántica que ofrece la EDEL, nos invita a cuestionar la interpretación ortodoxa o estándar, que parece defender ideas verosímiles si las vemos de forma independiente, pero que no encajan bien al tratar de integrarlas en un todo. Con esto me refiero, por ejemplo, a defender la idea de que el observador forma parte del sistema cuántico y simultáneamente decir que sólo necesitamos el formalismo cuántico (que no incluye ni al aparato ni al científico observador) para describir dicho sistema. En otras palabras, considero que la EDEL satisface, mejor que otras interpretaciones de la mecánica

¹⁰El tema de la verdad y el realismo en Bas van Fraassen es muy extenso, por lo que no será desarrollado. Sería desafortunado tratar de abarcarlo y nos llevaría a otras discusiones que se alejan del eje central de este trabajo.

cuántica, el criterio coherentista de racionalidad, de acuerdo con el cual **las creencias se justifican** [al menos en parte] **por su pertenencia a un conjunto coherente de creencias**¹¹. Si llamamos a esto "coherencia interna", podemos decir que la EDEL cuenta además con "coherencia externa" en tanto que es compatible con las teorías de la física clásica.

Pasemos ahora al problema de racionalidad abordado por Lombardi, que nos permite profundizar en el aspecto ontológico de la mecánica cuántica.



4.2 LOMBARDI: RACIONALIDAD Y ONTOLOGÍA EN MECÁNICA CUÁNTICA



4.2.1 ROMPIMIENTO DE LOS LAZOS ENTRE LENGUAJE, PENSAMIENTO Y REALIDAD.

En su artículo *Mecánica Cuántica: ontología, lenguaje y racionalidad*, Olimpia Lombardi tiene como objetivo "poner de manifiesto el modo en que la mecánica cuántica obliga a reflexionar acerca de la racionalidad teórica¹², en la medida en que pone en crisis ciertas categorías lógico-ontológicas básicas de la historia de la lógica y la metafísica." (Lombardi, p.2)

Lombardi explica cómo para Aristóteles la palabra 'logos' tenía un significado múltiple que entrelazaba al lenguaje, el pensamiento y la realidad. En aquél entonces era claro que podíamos expresar mediante nuestro lenguaje el conocimiento de la realidad. Pero estos lazos aristotélicos, desde el punto de vista de la autora, parecen romperse con especial relevancia en la mecánica cuántica porque no podemos describir con nuestro lenguaje natural la referencia de la teoría y, por tanto, no alcanzamos a comprender la realidad de la que nos habla (para más detalles ver Lombardi, p.1-2).



4.2.2 HEISENBERG, TEOREMA KOCHEN-SPECKER Y CONTEXTOS.

¹¹ Oscar Nudler, *¿Racionalidad o racionalidades? Hacia un pluralismo no relativista*.

¹² La división entre racionalidad teórica por un lado y la racionalidad práctica por el otro, es cuestionada frecuentemente. Villoro y más tarde Olivé, por ejemplo, consideran que las creencias siempre están unidas a la disposición que tenemos a actuar ante ellas. Pero para nuestro propósito no es relevante tomar partido a favor o en contra de la distinción. Claramente, Lombardi acepta la distinción entre racionalidad teórica y práctica y aclara desde un principio que se referirá sólo a la teórica.

El principio de incertidumbre de Heisenberg mostró que la teoría cuántica no permite determinar simultáneamente el valor preciso del momento y la posición de un sistema cuántico. A las observables¹³ que mantienen esta relación de indeterminación se les llama "incompatibles".

Lombardi señala que si bien el principio de Heisenberg mostraba la imposibilidad de determinar los valores de dos observables incompatibles de manera simultánea, no mostraba que tal asignación fuera imposible en principio. Por eso podía defenderse aún el argumento EPR de que la mecánica cuántica no daba cuenta de los valores de las observables del sistema cuántico por ser una teoría incompleta; y tenía sentido también hacer propuestas para completar la teoría, como lo hacían las teorías de variables ocultas.

El teorema de Simon Kochen y Ernst Specker (1967) fue más lejos que el principio de Heisenberg al demostrar que en un sistema cuántico **sólo es posible asignar simultáneamente valores a un subconjunto propio del conjunto de todas las observables mutuamente compatibles**. Esto es, que el formalismo cuántico impedía la asignación de todas las propiedades del sistema en un momento dado.

Para Lombardi, el resultado Kochen-Specker frustra todo intento de formular las teorías de variables ocultas al dejar claro que "no existe ningún camino para 'completar' la teoría de modo tal que sea posible predicar simultáneamente todas las propiedades del sistema." (Lombardi, p.5). Podemos agregar todas las variables ocultas que querramos al formalismo cuántico y a lo sumo podremos conocer las propiedades de uno de los subconjuntos de observables compatibles entre sí, subconjuntos que son conocidos como 'contextos'. Entonces, lo que mostraron Kochen y Specker fue que la asignación de las propiedades de un sistema cuántico es necesariamente contextual.

Lombardi apunta que el carácter contextual en la mecánica cuántica es diferente de cualquiera que pudiéramos encontrar en la física clásica. La autora explica que la matriz de densidad (de la que hablamos en el capítulo 2) tiene la propiedad de que los elementos de su diagonal principal nos dan información sobre las propiedades asociadas a un contexto y los elementos fuera de la diagonal se refieren a contextos diferentes.

¹³Paradójicamente, se llama "observables" a las variables de los sistemas cuánticos.

"Esta característica de la matriz de densidad pone de manifiesto que la **descripción completa** de un sistema cuántico exige contar con información referida a propiedades asociadas, al menos, a dos contextos diferentes. Pero, a la vez, la contextualidad de la mecánica cuántica expresada por el teorema Kochen-Specker impide adjudicar simultáneamente de un modo consistente valores a todas las observables del sistema. Por lo tanto, si bien el estado cuántico brinda una caracterización del sistema que es **completa en el sentido de no ser completable**, no permite asignar todas sus propiedades en un instante dado" (Lombardi, p.7, negritas mías)

Más adelante volveremos al punto de que la matriz de densidad contiene información sobre más de un contexto. Pero hay un punto que vale la pena recalcar en este momento y que creo que Lombardi aceptaría sin problemas: lo que demuestra el teorema Kochen-Specker es que la mecánica cuántica **nunca podrá completarse**, por lo tanto, frustra los intentos de variables ocultas, pero no derriba la idea de que la mecánica cuántica **sea incompleta** en el sentido de que pueda subsumirse en un formalismo más general, o "complementarse" de alguna otra forma. Nuevamente, optar por quedarse con el formalismo no-completable, o buscar teorías más generales como la EDEL que lo complementen (aunque ya no intenten completarlo formalmente) es una **decisión** interpretacional.

■ 4.2.3 PRINCIPIOS DE IDENTIDAD

El **principio leibniciano de identidad de los indiscernibles** afirma que si dos individuos poseen exactamente las mismas propiedades, entonces se trata de un mismo individuo (o de dos versiones del mismo individuo). Pero este principio, como expone Lombardi, no puede aplicarse a los objetos cuánticos tras el resultado de Kochen-Specker porque todas sus propiedades no pueden ser simultáneamente determinadas. El principio de Leibniz **presupone el principio de determinación omnimoda**, según el cual, para cualquier individuo, todas las propiedades se encuentran objetivamente determinadas. Pero el teorema Kochen-Specker pone en crisis este último principio, provocando que el principio leibniciano para discernir entre individuos no pueda siquiera ser expresado en su forma original.

Como se muestra en la figura 7, en mecánica cuántica podemos encontrarnos con dos objetos cuyas propiedades conocidas sean iguales pero que no sean "idénticos".

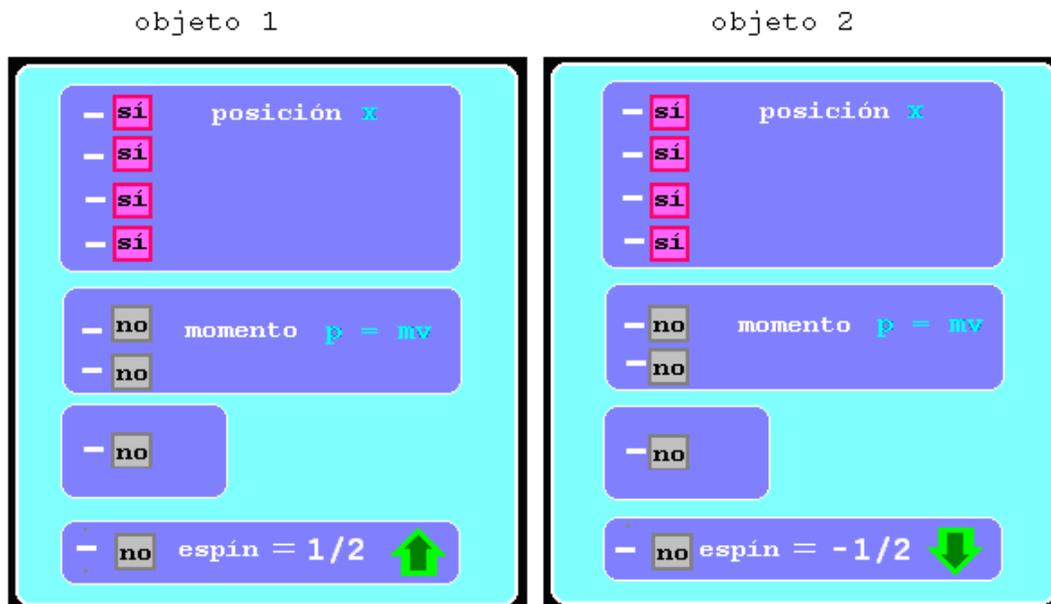


Figura 7. Objetos cuánticos indistinguibles pero no idénticos.

En la figura 7 cada rectángulo representa un contexto. El teorema Kochen-Specker nos dice que sólo podemos conocer simultáneamente las propiedades correspondientes a uno de ellos. Las marcas **sí** nos muestran que aquí conocemos, tanto en el objeto 1 como en el objeto 2, las propiedades del primer contexto, pero no podemos conocer las propiedades de los demás contextos. Tomando en cuenta la información que tenemos, no podemos discernir entre los dos objetos. Sin embargo, en un contexto cuya información nos es inaccesible en principio, los objetos pueden tener propiedades distintas y por tanto no ser idénticos.

Como la figura 7 es muy simplificada, mencionaremos un aspecto que se dejó de lado para poder dibujarla y esto nos dará una mejor idea de la fuerza del teorema Kochen-Specker.

En la figura se está suponiendo que podemos hacer una lista de las propiedades del objeto cuántico y dividir las en subconjuntos, pero esto es imposible según el teorema Kochen-Specker. Como explica Lombardi, el teorema es tan fuerte que nos dice, incluso, que si hay una propiedad **P** que pertenece a dos contextos, puede suceder que al asignar el valor p_1 a **P** desde un contexto y el valor p_2 a **P** desde otro contexto, pudiera resultar que $p_1 \neq p_2$. Esto significa que **el valor de P no está determinado independientemente del contexto** y por tanto no es aplicable la teoría de conjuntos a la "lista de propiedades" del objeto. Esa lista, simplemente, no puede formularse.

Por otro lado, en física clásica, la posición ayuda a distinguir entidades individuales: como dos objetos no pueden ocupar la misma región del espacio al mismo tiempo, la posición es lo que permite diferenciarlos cuando son idénticos en el resto de sus propiedades. Pero en mecánica cuántica el principio de Heisenberg nos enseña que sólo podemos conocer la posición pagando el precio de ignorar todas las propiedades que pertenezcan a otros contextos. Y el teorema de Kochen-Specker profundiza el problema: un objeto no posee una posición determinada puesto que la posición sólo adquiere un valor determinado desde un contexto, quedando necesariamente indeterminada desde otros contextos.

Es así como explica Lombardi que el teorema Kochen-Specker pone en crisis los principios de identidad clásicos basados en la posibilidad de diferenciar a las entidades por sus propiedades.

■ 4.2.4 PREGUNTAS ONTOLÓGICAS

Ante las características de la mecánica cuántica y, en particular, ante las consecuencias del resultado Kochen-Specker, Lombardi plantea las siguientes preguntas ontológicas:

¿Cómo comprender estos objetos cuánticos que no poseen todas sus propiedades determinadas y, en consecuencia, no cumplen con el principio de identidad?

¿Cómo podemos **hablar** de que "un electrón ha dejado la traza de su trayectoria en la cámara de niebla" si recordamos que sólo es posible adjudicar simultáneamente propiedades a un sistema cuántico desde un contexto?

La autora se pregunta en qué sentido podemos referirnos con nuestro lenguaje a una **entidad individual** portadora de propiedades definidas, como un electrón o un fotón, si cada conjunto de propiedades parece corresponder a un objeto, pero no es posible pensar en una entidad individual que subyace a las propiedades en la medida en que no es admisible predicar todas sus propiedades simultáneamente. (Para más detalles ver Lombardi, p.11)

Desde el punto de vista de Lombardi, en el momento que no podemos hablar de entidades individuales, ni distinguirlas de otros individuos, nuestro lenguaje natural y nuestra lógica clásica, con sujetos y predicados, no nos sirve para referirnos a los sistemas cuánticos, lo cual plantea un serio desafío a las categorías ontológicas tradicionales.

4.2.5 DOS ONTOLOGÍAS ALTERNATIVAS

Lombardi se pregunta, entonces, si la salida al problema ontológico puede hallarse en una nueva concepción de la estructura categorial de la ontología cuántica. "En particular, si el objeto cuántico se escurre cada vez que intentamos asirlo, tal vez la mejor estrategia sea abandonarlo" La autora propone así, "prescindir del objeto cuántico como entidad fundamental y, con ello, ... adoptar una ontología de propiedades... en la que el objeto cuántico sólo se constituye contextualmente como un haz de propiedades" (p.12)

Entonces, las dos ontologías alternativas serían:

- 01) **ontología tradicional** con entidades individuales de las que pueden predicarse propiedades.
- 02) **ontología de haces** de propiedades.

Para Lombardi, la elección entre las dos ontologías en el caso de la física clásica es una cuestión de preferencias metafísicas, pero en el caso de la mecánica cuántica es la teoría misma la que impone las limitaciones que llevan a inclinarse por la ontología de haces de propiedades, en la que parece apropiado identificar cada haz con un contexto.

4.2.6 ¿DESAFÍA LA MECÁNICA CUÁNTICA A LA RACIONALIDAD?

Lombardi sostiene que una vez que se acepta una ontología de haces de propiedades, nuestro lenguaje natural y la lógica clásica con sujetos y predicados resultan inadecuados: "los nombres ya no tienen que nombrar pues no existen siquiera los haces de propiedades que juegan el papel de individuos [como en el caso clásico]... En definitiva, la mecánica cuántica parece referir a una ontología de la cual no podemos hablar con nuestros lenguajes, sean éstos naturales o artificiales." (P.13-14)

Todo esto lleva a la autora a cuestionarse, regresando a los lazos aristotélicos entre pensamiento, lenguaje y realidad, si la mecánica cuántica nos impide entender su ontología, una ontología que no podemos

describir con nuestros lenguajes. A la pregunta ¿la mecánica cuántica desafía a la racionalidad? Lombardi nos responde: no, no si adoptamos un criterio más amplio de racionalidad que supere las limitaciones de nuestro lenguaje de objetos y propiedades y permita concebir nuevas estructuras de lo real.

■ 4.2.7 SALIDA DE LA EDEL

Considero que la EDEL podría responder al interesante planteamiento de Lombardi, diciendo que, en efecto, el principio de incertidumbre de Heisenberg y el teorema de Kochen-Specker nos hablan de la imposibilidad de adjudicar valores determinados a observables incompatibles de manera simultánea, pero que aún así podemos ver estos resultados como meras consecuencias del formalismo cuántico que no tienen por qué llevarnos a abandonar la ontología tradicional. Como la misma Lombardi menciona en su artículo, el principio de Heisenberg no es un resultado de deficiencias experimentales o limitaciones empíricas, sino una demostración formal que surge de la propia teoría, dentro de un esquema conceptual definido, pero no inevitable.

Ante la imposibilidad de adjudicar todas las propiedades a **entidades individuales**, antes que adoptar una ontología de propiedades, la EDEL optaría por una ontología de **conjuntos de individuos** (ensambles). Con esta ontología diríamos que el formalismo cuántico nos permite conocer los pesos probabilísticos de obtener ciertas propiedades del ensamble, pero no podemos conocer las propiedades específicas de cada uno de los miembros. Esto nos permitiría seguir expresando la realidad que queremos describir con nombres y adjetivos, con sujetos que se refieren al ensamble y predicados que nos hablan de sus propiedades, rescatando así el uso de nuestros lenguajes lógicos y naturales.

Lombardi señala que hay al menos dos dificultades formales en ofrecer una salida vía la interpretación de ensambles: en primer lugar, la mecánica estadística clásica (con la que se describen y analizan los ensambles) tiene una estructura llamada Booleana, que es compatible con la lógica proposicional clásica y con la teoría de conjuntos. Pero, como vimos en la sección anterior, el teorema Kochen-Specker mostró que la mecánica cuántica no tiene una estructura booleana, sino una estructura más general que impide hablar de ensambles con las conectivas lógicas. La segunda dificultad formal, relacionada con la anterior, se refiere a la probabilidad. La función clásica de probabilidad cumple con axiomas que también están basados en una estructura booleana, por lo tanto, dice

Lombardi, las probabilidades cuánticas (si es que pueden llamarse probabilidades) no son en modo alguno las probabilidades de la mecánica estadística clásica.

A mi modo de ver, los autores de la EDEL responderían a las dificultades planteadas por Lombardi, diciendo que su interpretación de ensamble no se ve afectada por el teorema Kochen-Specker en la medida en que la EDEL **no pretende completar el formalismo de la mecánica cuántica desde el interior de la teoría**, cosa que imposibilita el teorema, sino que propone una teoría más general, a partir de la cual podemos entender lo que parece tan confuso desde el interior de la mecánica cuántica.

Kochen y Specker dirían: por más variables que se agreguen al formalismo cuántico, la teoría jamás podrá completarse, jamás podremos conocer todas las propiedades del sistema... y la EDEL respondería: totalmente de acuerdo, el formalismo cuántico nos habla de ensambles de partículas y no puede definir simultáneamente todas sus propiedades. Pero esto no nos obliga a abandonar nuestros lenguajes naturales o a cambiar de ontología. Entonces, dejemos el formalismo cuántico como está y tratemos de entender los resultados que obtenemos de él y los fenómenos del microdominio con una nueva teoría más amplia que nos permita analizar la mecánica cuántica desde un punto de vista externo, i.e., ver a la mecánica cuántica como derivada de una teoría más fundamental.

Hay todavía un detalle que atender en la respuesta de la EDEL: si es una teoría más amplia que contiene a la mecánica cuántica, entonces tiene que aceptar que está incluyendo una estructura no booleana. Los autores de la EDEL responderían en este caso que, más que incluir a la mecánica cuántica, la EDEL lleva a la mecánica cuántica mediante aproximaciones. En éstas aproximaciones hacia la cuántica, se tienen que adoptar ciertas herramientas formales, que ciertamente pueden tener una estructura no-booleana, pero esto no afecta a la EDEL que se ha quedado atrás en el momento de la derivación. No sin antes dejar una huella fundamental, pues ha aportado una estructura causal subyacente a la teoría cuántica.

Del mismo modo que ocurriría con la aparición de la no-localidad, Luis de la Peña y Ana María Cetto nos explicarían que las características

(muchas veces indeseables para ellos) que se dan en el estado cuántico, no afectan a la EDEL y por tanto no tienen consecuencias en su ontología.

Con esto podemos ver que hay un desacuerdo racional en el que la EDEL, por un lado, y la propuesta de Lombardi por otro, ofrecen puntos de vista sólidos a partir de los cuales podemos sostener ontologías diferentes para la mecánica cuántica. En el caso de Lombardi, una ontología de propiedades más acorde con las propiedades que podemos adjudicar al sistema cuántico de manera simultánea. Y en el caso de la EDEL, una ontología tradicional, que es compatible con nuestro sentido común y que nos permite seguir expresándonos acerca de la realidad mediante nuestros lenguajes formales y naturales, manteniendo los lazos aristotélicos.

Tanto Ana María Cetto y Luis de la Peña, como Olimpia Lombardi, encuentran en su postura la mejor manera de satisfacer los valores epistémicos y los objetivos científicos que consideran más importantes: para los primeros es primordial mantener una postura realista, en la que la existencia del campo de fondo es fundamental para entender los fenómenos cuánticos, mientras que para Lombardi esto no es primordial.

4.2.8 COMENTARIO SOBRE LA MATRIZ DE DENSIDAD

Más allá de la postura de la EDEL, quisiera hacer un comentario al artículo de Lombardi respecto de la necesidad de contar con información de más de un contexto a la hora de describir los sistemas cuánticos mediante la matriz de densidad.

Supongamos por un momento que aceptamos con Lombardi la ontología de haces de propiedades y abandonamos al "escurridizo objeto cuántico". Ahora pongamos nuestra atención en un estado cuántico que, de hecho, para ser descrito requiere una matriz de densidad con elementos no nulos fuera de la diagonal, esto es, que requiere elementos de dos contextos o dos haces distintos para ser descrito.

Entonces ¿qué ventaja tiene adoptar la ontología de haces de propiedades, si de cualquier forma no nos sirve un solo haz para describir al sistema cuántico? ¿Qué ventaja tiene si los sistemas cuánticos se nos escapan con nuestra nueva ontología tanto como con la ontología tradicional?

Lombardi podría responder que la ventaja de la O2 es que los haces de propiedades coinciden con los conjuntos de observables que, según el teorema Kochen-Specker, pueden adquirir valores determinados simultáneamente, esto es, que la ontología que propone es apegada a una propiedad fundamental del formalismo cuántico. Pero no sé si esto sería tan valioso como para ameritar romper con el lenguaje natural y con la lógica estándar donde las proposiciones expresan la adjudicación de propiedades a entidades individuales. Con esto no quiero decir que me inclino por la ontología tradicional O1 sobre la ontología de haces de propiedades O2, sólo me parece que ambas tienen dificultades similares cuando tratamos con sistemas cuánticos cuyas matrices de densidad contienen información acerca de varios contextos.



4.3 ¿QUÉ TAN RACIONAL ES LA DEFENSA DE LA EDEL?

A partir de la evaluación de la EDEL con los criterios generales de racionalidad y la respuesta al problema planteado por Lombardi, podemos concluir que, si bien la EDEL no está exenta de dificultades, hay muchos argumentos para defender su carácter racional frente a otras interpretaciones de la mecánica cuántica: explica un gran número de fenómenos cuánticos independientes y no sólo los describe sino que además ofrece una explicación causal para ellos, con lo que responde a ¿cómo? y ¿por qué? se dan; es coherente, revisable y contrastable, compatible con la lógica clásica, tiene soporte empírico y mantiene una ontología de sujetos y predicados compatible con nuestro lenguaje natural.



CONCLUSIONES

La EDEL provee una base sólida desde el punto de vista epistemológico para defender una postura filosófica realista y causal respecto a la mecánica cuántica.

La EDEL ofrece explicaciones causales con base en la hipótesis de que existe un campo de radiación de fondo que interactúa con las partículas subatómicas, causando los fenómenos cuánticos. Ejemplos de esto son la explicación del experimento de la doble rendija (sección 3.3.4), las explicaciones de la barrera y el pozo de potencial (apéndice 4), la explicación que ofrece para la estabilidad del átomo o, de forma más general, para la cuantización de la energía (sección 1.3), etc.

Con este enfoque, la EDEL abandona el análisis de sistemas cerrados para adoptar un análisis de sistemas abiertos, donde los átomos y sus partes interactúan con el medio que los rodea. Esto no sólo implica un cambio fundamental en la unidad de análisis y la adopción, por tanto, de una ontología distinta, sino que también lleva a un estudio esencialmente distinto de los sistemas cuánticos, donde los problemas relevantes son otros y del cual, en un futuro, se podrían desprender nuevos descubrimientos y nuevas ramas de investigación.

Tanto la introducción del campo de fondo en sus explicaciones causales, como la adopción del análisis de sistemas abiertos, distinguen a la EDEL de la interpretación ortodoxa, interpretación con mayor aceptación actualmente.

Al ubicar a la EDEL entre otras interpretaciones de la mecánica cuántica, como la de Bohr y la de Einstein, no hay duda de que la EDEL se acerca mucho a la interpretación realista einsteniana, por su propuesta de una teoría más amplia que resuelva los problemas de la mecánica cuántica desde un punto de vista externo y por su postura crítica ante las interpretaciones ortodoxas. Sin embargo, es importante destacar que la EDEL, a diferencia de Einstein, no pretende ya recuperar el determinismo (o predictividad individual) en las descripciones cuánticas. Esto es imposible debido a la complejidad del campo de fondo.

Analizando todas las respuestas de la EDEL a los problemas conceptuales de la mecánica cuántica, podemos decir que el denominador común en ellas es que los autores de la EDEL, Luis de la Peña y Ana María

Cetto, consideran que muchos de los problemas planteados, entre ellos el de la no localidad, el del indeterminismo y el de los estados superpuestos anteriores a la medición, son consecuencias del formalismo cuántico que no deben tener ninguna de las repercusiones ontológicas que comúnmente se les adjudican.

Para Luis de la Peña y Ana María Cetto los compromisos ontológicos deben desprenderse de la experimentación, de los resultados obtenidos no sólo en una teoría, sino también en otras teorías físicas, pero no necesariamente del aparato formal de la teoría. Las características o dificultades que presenta el aparato formal pueden servir para aprender más sobre las entidades cuánticas, pero adquirir compromisos antirrealistas por esas características formales puede ser muy peligroso.

Los compromisos ontológicos de la EDEL, por ejemplo, se desprenden de los resultados experimentales del efecto Casimir (apéndice 5), de la cosmología que tiende a apoyar la teoría del campo de fondo, de la electrodinámica, en fin. Se basan en la teoría atómica con al menos dos siglos de respaldo, en las otras teorías físicas que nos han venido indicando cómo funcionan los sistemas que estudian. Su realismo empírico está arraigado en la convicción de los autores de que existe un mundo independiente del observador, con una estructura definida, cuyo funcionamiento estamos tratando de entender.

Los autores de la EDEL están en contra de tomar en cuenta al observador como parte del sistema cuántico. Por esta razón la EDEL no lo incluye en momento alguno durante sus explicaciones. Asimismo, intenta dejar fuera principios que carezcan de justificación empírica, como es el caso del principio de complementariedad.

Ana María Cetto y Luis de la Peña rechazan la idea de que "la faceta ondulatoria y la faceta corpuscular de la luz son contrarias pero complementarias". Desde su punto de vista los dos fenómenos no son contrarios y excluyentes, sino que coexisten, están presentes en todo momento y uno prevalece sobre el otro, dependiendo de las condiciones físicas que se presentan. El ondulatorio se manifiesta básicamente en el ensamble estadístico y el corpuscular en el elemento individual.

Otro elemento que los autores de la EDEL dejaron fuera de su teoría es el "colapso de la función de onda". Para ellos la medición no tiene un papel fundamental en la teoría, porque es una cuestión metodológica que no nos dice nada sobre los fundamentos del mundo.

El diagrama siguiente ayuda a explicar por qué Luis de la Peña y Ana María Cetto pueden aceptar que la no localidad y el indeterminismo son característicos de la mecánica cuántica, pero no de la EDEL.

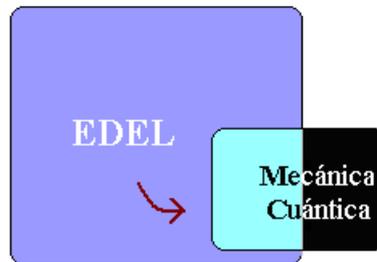


Fig.8 Aproximación de la EDEL a la mecánica cuántica

La EDEL es una teoría cuántica, por el papel central que juega en ella la constante de Planck \hbar , pero también es una teoría causal, realista y local. La pérdida de la localidad, de la causalidad, de las propiedades booleanas, etc., se da **cuando se realiza la aproximación cuántica**, esto es, cuando la aplicación de herramientas formales aleja a la teoría de su referente real. En el diagrama (fig.8) podemos ver que la EDEL no contiene completamente a la mecánica cuántica: hay una parte (iluminada en negro) de ella que queda fuera. Se puede llegar a esa parte de la mecánica cuántica desde la EDEL, haciendo aproximaciones, pero es entonces cuando se pierden las características causales y locales.

Al responder la pregunta ¿qué tan razonable es la defensa de la EDEL frente a otras interpretaciones de la mecánica cuántica? mostramos que la mecánica cuántica es una teoría indeterminada en el sentido Duhem-Quine, porque pueden sostenerse posturas en conflicto respecto a su ontología: por un lado la "ontología de propiedades" que propone Olimpia Lombardi y por el otro lado la "ontología" de ensamblajes de partículas que defiende la EDEL. Desde mi punto de vista ambas ontologías tienen virtudes y dificultades. La ontología de propiedades sin duda es más compatible con el formalismo cuántico, pero se aleja del lenguaje natural y tiene complicaciones al tratar con sistemas cuánticos cuyas matrices de densidad contienen información acerca de varios contextos. La ontología de ensamblajes de la EDEL, por su parte, es más compatible con el sentido común y permite hablar de entidades reales, como el campo de fondo, que le dan fuerza explicativa a la teoría. Pero debe aceptar que al aproximarse a la mecánica cuántica las entidades y sus propiedades no tienen una correspondencia clara con el formalismo.

Aplicando criterios básicos de racionalidad a la EDEL, concluimos que es una teoría, revisable y contrastable, que responde a ¿cómo? y ¿por

qué? se dan los fenómenos cuánticos. Está respaldada por sus resultados empíricos, su rigor teórico, su coherencia con otras teorías físicas y su compatibilidad con la lógica clásica. Además recupera una ontología de sujetos y predicados que va de acuerdo con nuestro lenguaje natural y nuestro sentido común. Por lo tanto, a pesar de las dificultades que enfrenta y del trabajo que queda por delante, la EDEL se sostiene desde el punto de vista epistemológico.

Todo lo anterior nos permite concluir que la EDEL es una teoría epistemológicamente firme, cuyas consecuencias filosóficas se consolidan en una postura realista y causal, a partir de la cual se ofrece una salida original a algunos de los problemas conceptuales más importantes de la mecánica cuántica.

Para cerrar quisiera comentar cómo cambió mi postura filosófica al hacer este trabajo. Hace un par de años yo simpatizaba con las posturas antirrealistas respecto a la mecánica cuántica, esto es, prefería aquellas interpretaciones en las que los compromisos con la existencia de las partículas cuánticas y la idea de que hay una estructura causal que subyace a todo el universo, se veían diluidas o incluso anuladas. Sin embargo, la investigación que realicé para la elaboración de este trabajo me desplazó a una especie de escepticismo ontológico. Hacer una lectura de la teoría cuántica desde un punto de vista realista, me permitió apreciar algunas de las dificultades que surgen al defender las interpretaciones ortodoxas, con tendencia antirrealista, que son ampliamente difundidas y aceptadas hoy en día. En particular me parece problemático darle un papel primordial al observador, aceptar el colapso de la función de onda y hacer estas dos cosas desde una postura de corte positivista. Por otro lado, conocer un poco más las características no locales y contextuales del formalismo cuántico, me ayudó a comprender que combinarlo con una ontología realista es sumamente complicado. Es precisamente por esto último que la propuesta de la EDEL es tan valiosa.



BIBLIOGRAFÍA

Arana, Juan. *Causalidad y objetividad. Schrödinger y el trasfondo filosófico de la física cuántica.* En la antología de Maiax, Carmen y Andrés Rivadulla, eds. Física Cuántica y Realidad, Universidad Complutense, 2002. p. 73-97.

Ballentine, L.E. ed, Foundations of quantum mechanics, since the bell inequalities, American Association of Physics Teachers, 1988.

Beller, Mara. "Quantum Dialogue", University of Chicago Press, 1999.

Bohr, Niels. 1934, La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza, traducción y prólogo de Miguel Ferrero Melgar, Alianza Editorial, Madrid. 1988.

Chimal, Carlos. Luz interior: Conversaciones de Ciencia y Literatura, Tusquets editores. Dirección General de Divulgación de la Ciencia, UNAM. México, 2001.

De la Peña, Luis y Ana María Cetto. *Stochastic Theory for Classical and Quantum mechanical Systems.* Foundations of Physics, Vol.5, 1975.

De la Peña, Luis. Introducción a la Mecánica Cuántica. Fondo de Cultura Económica, 1977.

De la Peña, Luis y Ana María Cetto, "Does Quantum Mechanics accept a Stochastic Support?" Foundations of Physics, Vol.12, No.10., October, 1982

De la Peña, Luis y Ana María Cetto, The Quantum Dice, Kluwer Academic Publishers, EUA, 1996.

De la Peña, Luis. Albert Einstein, navegante solitario, Fondo de cultura económica, México, 1987. capítulo 4, p.75-94.

De la Peña, Luis. *En busca de los fundamentos físicos de la Mecánica Cuántica.* Instituto de Física, UNAM, 2005.

De la Peña, Luis y Ana María Cetto, *Contribution from stochastic electrodynamics to de understanding of Quantum Mechanics.* 2005

De la Torre, Alberto Clemente, Física Cuántica para filo-sofos, Ed. Fondo de cultura económica, México, 1992.

Einstein, Albert. "Física y Realidad", Journal of the Franklin Institute, marzo de 1936.

Einstein, Albert. Correspondencia Born-Einstein, 1916-1955, Ed. Siglo XXI, México, 1973.

Feynman, Richard. Física, Volumen III: Mecánica Cuántica, Adison Wesley Longman de México, 2000. Primera edición en español, 1971.

Fine, Artur, The Shaky Game, Einstein Realism and the Quantum Theory, University of Chicago Press, 1986.

Folse, Henry. 1985, The Philosophy of Niels Bohr. North-Holland Physics Publishing.

Gadamer, Hans Georg. 1881, La dialéctica de Hegel, traducción de Manuel Garrido, Ediciones Cátedra, S.A. Madrid.

García-Colín Leopoldo, Marcos Moshinsky et al. 1986, Niels Bohr: Científico, Filósofo y Humanista, Fondo de Cultura Económica, México, DF.

Goethe, J.W. 2002 (1780-1805) "El ser humano es el instrumento exacto" y "La observación en la naturaleza no tiene límites" en Goethe y La Ciencia, Ediciones Ciruela.

Goodfield, G. J. 1987, El Desarrollo de la Fisiología Científica : El método fisiológico y la controversia, mecanicismo-vitalismo ilustrados por los problemas de la respiración y el calor animales, traducción de Jorge Brash, México, UNAM, Instituto de Investigaciones Filosóficas.

Hacyan, Shahan. Física y metafísica del espacio y el tiempo, Ed. Fondo de Cultura Económica, Méxcio, 2004.

Hall, Thomas S. 1969, History of General Physiology, Vol.2, University of Chicago Press.

Hankins, Thomas L. 1988 (1985), Ciencia e Ilustración, capítulo 5: "Historia natural y fisiología", pp.120-169.

- Holton, Gerald.** 1973, Ensayos Sobre el Pensamiento Científico en la Época de Einstein. Traducción: José Otero, Alianza Editorial, Madrid. 1982. Cap.3
- Home, Dipankar.** Conceptual Foundations of Quantum Physics. Plenum Press, NY, 1997.
- Jammer, Max.** The Philosophy of Quantum Mechanics, John Wiley and sons, 1994. P.288-92
- Kragh, Helge,** "Quantum generations", Princeton University Press, USA, 1999. Cap.4: Atomic Architecture, cap.11: Quantum Jumps.
- Laloë.** *Do We Understand Quantum Mechanics? Strange correlations, paradoxes, and theorems.* Laboratoire de Physique de lens. Paris, Francia, escrito en noviembre de 1998, publicado en enero del 2001.
- Lawrence, Christopher,** "The power and the glory; Humphry Davy and Romanticism" en Cunningham y Jardine (eds) Romanticism and the Sciences, 1990, p. 213-227
- Lenoir, Timothy,** "Morphotypes and the historical-genetic method in Romantic biology" en Cunningham y Jardine (eds) Romanticism and the Sciences, 1990, pp. 119-129
- Lobardi, Olimpia.** "Mecánica cuántica y no-localidad: ¿con cuántos dados juega Dios?" Por publicarse en "Fuerzas y Dinámica" editado por Laura Benítez y José Antonio Robles, Instituto de Investigaciones Filosóficas, UNAM, México.
- Lobardi, Olimpia.** El Problema del Determinismo en la Física, Tesis Doctoral, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires, 2000. pp. 1-49.
- Merz, John Theodore,** 1891. A history of European thought in the nineteenth century. Gloucester, Massachusetts, 1976.
- Meyer-Abich Adolf,** 1969, La Filosofía de Alejandro de Humbolt, Biblioteca Electrónica de Colombia, <http://www.banrep.gov.co/blaavirtual/letra-g/geoplan/anexfilo.htm>
- Olivé, León.** Conocimiento, Sociedad y Realidad, Fondo de cultura económica, México, 1988. capítulo 9: *Sobre el realismo científico.* p. 211-262
- Olivé, León,** *Realismo y antirrealismo en la concepción semántica de las teorías,* Revista CRÍTICA / Vol. XVII / No.51, p.34
- Penrose, Roger y John Stachel.** Einstein 1905: un año milagroso, Editorial Crítica, España, 2001.
- Prado Galán, Javier.** 2001, Fernando Savater: grandeza y miseria del vitalismo , Universidad Iberoamericana, México, DF, capítulo: Vitalismo Nietche-Spinozista
- Richards, R. J.** "Mechanism, Teleology and evolution" capítulo.9 de The Romantic Conception of Life, pp. 307-321
- Sanz, Elena y Aleu Marià Baig¹.** 2002, "Niels Bohr", en *Ciencia Digital, Ciberfascículos "Grandes Científicos del Siglo XX"* (publicación electrónica) http://ichasagua.dfis.ull.es/cientificos/frame_bohr.html
Sección 1: La Era Atómica de la mano de Bohr
Sección 2: La contribución de Niels Bohr a la física del siglo XX
- Van Fraassen, Bas C.,** 1991, Quantum Mechanics: An Empiricist View, Oxford University Press.
- Van Fraassen, Bas C.,** 1992, La Imagen científica, trad. Sergio Martinez, Mexico, Paidós, UNAM, 1996.
- Van Fraassen, Bas C,** 1998, "Review: J. Bub, Interpreting the Quantum World Foundations of Physics", p. 683-689.
- Van Fraassen, Bas C.** "Constructive Empiricism and Modal Realism" (with Bradley Monton) Reply to Ladyman. Penultimate version.

¹ Baig es investigador en el Instituto de Física de la Universitat Autònoma de Barcelona y, entre otras cosas, realiza trabajos de Biología Cuantitativa.

Whitaker and Home. *Ensemble Interpretations of quantum Mechanics*. Department of Pure and Applied Physics, Queen's University of Belfast, Northern Ireland, Agosto de 1991.

Wick, David. The Infamous Boundary, Copernicus Press, Boston, 1995. Cap.12.

Wilson, Fred L. 1996, *History of Science*, Rochester Institute of Technology, Sección 23: Quantum Mechanics
<http://www.rit.edu/~flwstv/quantum.html>

Williams, Elizabeth, A. A Cultural History of Medical Vitalism in Enlightenment Montpellier, 2003.

Zac, Sylvain, 1963, L'idee de vie dans la philosophie de Spinoza, Presses Universitaires de France, Paris, capítulo 4: Les êtres vivants ne sont pas des machines.

Zinkernagel, Henrik. *Bohr's relevance to philosophy and contemporary physics*. En la antología de Maiax, Carmen y Andrés Rivadulla, eds. Física Cuántica y Realidad, Universidad Complutense, 2002. p.155-171.



Artículos que se publicarán próximamente en la antología sobre Racionalidad editada por Ana Rosa Pérez Ransanz y Ambrosio Velasco. Instituto de Investigaciones Filosóficas de la UNAM, México, D.F.

Álvarez, J. Francisco. "La tijera de Simon y la racionalidad ecológica"

Álvarez, Sebastián. "Racionalidad y diversidad en la ciencia"

Broncano, Fernando. "Tres esferas normativas de la racionalidad personal"

Casanueva, Mario. "Tres aspectos de la racionalidad científica"

Echeverría, Javier. "Dos dogmas del racionalismo (y una propuesta alternativa)"

Lombardi, Olimpia. "Mecánica Cuántica: ontología, lenguaje y racionalidad"

Mosterín, Jesús. "La universalidad de la racionalidad científica"

Nudler, Oscar. "¿Racionalidad o racionalidades? Hacia un pluralismo no relativista"

Paruelo, Jorge y Hernán Miguel. "Explicación científica y elección racional entre teorías".

Zamora, Jesús. "Mosterín o de la razón".



OTRAS FUENTES

<http://www.free-definition.com/Bohr-effect.html>, <http://bo-info.med9.com/bohr's-equation.htm>

<http://www.ceemast.csupomona.edu/nova/bohr.html>,

<http://www.profisica.cl/personajedelmes/biografias.php?id=3>

<http://www.elcultural.es/HTML/20040909/Ciencia/CIENCIA10206.asp>

<http://micro.magnet.fsu.edu/optics/timeline/people/bohr.html>

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/sternGerlach/sternGerlach.htm>

<http://axxon.com.ar/zap/c-zapping0153.htm>

<http://www.fisica.unam.mx/teo/proyectos17.htm>

<http://focus.aps.org/story/v2/st28>

http://www.larouchepub.com/eiw/public/2005/2005_50-52/2005-51/pdf/box18_49.pdf

http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/teoria/A_Franco/cuantica/pozo/caja.htm



Apéndice 1: Cálculo de las órbitas estables del átomo de hidrógeno

En el capítulo 22 de su libro "Introducción a la Mecánica Cuántica", el Dr. Luis de la Peña ofrece una demostración cualitativa de que las hipótesis básicas de la EDEL conducen a la existencia de una órbita estable para el estado base del átomo hidrogenoide:

"Considerando la órbita promedio como esencialmente circular (esto es legítimo, pues la pequeñez de \hbar significa que las trayectorias estocásticas reales dominantes no difieren demasiado de las clásicas), en la aproximación bipolar la potencia radiada por el electrón orbital es:

$$P_{\text{rad}} = \frac{dW_{\text{rad}}}{dt} = \frac{2e^2}{3c^3} \omega^4 r^2, \quad (22.1)$$

en donde se tomó en cuenta que para una órbita circular $|\dot{\mathbf{r}}| = \omega |\mathbf{r}| = \omega^2 r$

Por otra parte, sabemos que la potencia que el electrón absorbe del campo de fondo es proporcional a la densidad espectral, por lo que podemos

escribir que $P_{\text{abs}} = A\rho(\omega)$ para determinar el orden de magnitud de la constante A, hacemos un análisis dimensional, proponiendo que ella depende de las propiedades del electrón, es decir, de e y de m ; se obtiene

$A \sim e^2/m$, luego podemos escribir:

$$P_{\text{abs}} = \eta \frac{e^2}{m} \rho(\omega) = \frac{2}{3} \eta \frac{\hbar e^2}{mc^3} \omega^3, \quad (22.2)$$

en donde η es un parámetro numérico del orden de la unidad, cuyo valor no interesa fijar mejor aquí. Si existe equilibrio, deberá corresponder a la situación en que se establece un balance entre la potencia absorbida y la radiada; igualando las ecuaciones (22.1) y (22.2) obtenemos

$$m\omega r^2 = \eta \hbar, \quad (22.3)$$

que coincide con la regla de cuantización de Bohr para el estado base (tomando $\eta = 1$). Por lo demás, del teorema del virial se sigue para la órbita circular que:

$$E = -T = \frac{1}{2} V = -\frac{1}{2} m\omega^2 r^2 = -\frac{Ze^2}{2r};$$

eliminando w con ayuda de la Ec.(22.3), obtenemos para el radio de la órbita:

$$r = \eta^2 \frac{\hbar^2}{Zme^2} = \frac{\eta^2}{Z} a_0,$$

en donde a_0 es el radio de Bohr y sustituyendo este resultado obtenemos para la energía

$$E = \frac{Zme^4}{\eta^2 \hbar^2}$$

Estos resultados coinciden con los que predice la teoría de Schrödinger si se toma $\eta = 1$. Podemos demostrar además que la órbita obtenida es estable; en efecto, de las ecuaciones (22.1) y (22.2) y del teorema virial en la forma usada arriba se sigue por eliminación de \square y r que la potencia ganada por el electrón es

$$P_{\text{gan}} \equiv P_{\text{abs}} - P_{\text{rad}} = \text{const} \left[\eta \sqrt{\frac{2}{m}} |E| - \frac{Ze^2}{\hbar} \right] E^{\frac{3}{2}}.$$

Supóngase ahora que $|E|$ crece porque la partícula se acerca al núcleo a partir de su distancia de equilibrio, para la cual $P_{\text{gan}}=0$; como en este caso $P_{\text{gan}}>0$, el electrón gana energía y se aleja del núcleo. Por el contrario, cuando E decrece, $P_{\text{gan}}<0$ y el electrón pierde energía, regresando a su posición de equilibrio.



Apéndice 2: La decoherencia y la matriz de densidad¹

Los sistemas cuánticos pueden estar en estados de superposición cuántica, que dan lugar a fenómenos de interferencia. Estos estados de superposición llamados "coherentes" nunca son observados a nivel macroscópico. Y la teoría de la decoherencia más difundida explica esto afirmando que la pérdida de la coherencia se debe a que los sistemas cuánticos quedan entrelazados con los sistemas macroscópicos, que son no-coherentes.

Cuando el sistema cuántico entra en contacto con el ambiente los estados pierden la coherencia y los términos de interferencia se desvanecen lo cual, en términos de la matriz de densidad, significa que los elementos fuera de la diagonal quedan anulados. Finalmente, cuando se realiza una medición, se obtiene un resultado único.

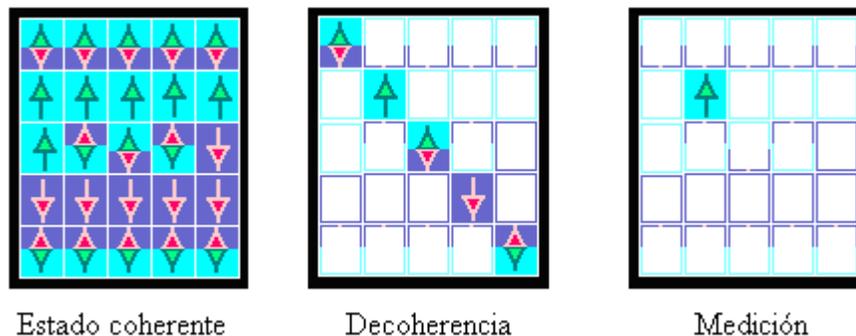


Figura 9. Matriz de densidad en la decoherencia y la medición

Veamos un ejemplo: Sea el estado coherente $|\Psi\rangle = a \Psi_1(x, t) + b e^{i\alpha t} \Psi_2(x, t)$

La matriz de densidad de este estado contiene elementos dentro y fuera de la diagonal. Los términos no diagonales son términos de interferencia debidos a la coherencia del estado.

Supongamos que α es un parámetro estocástico cuyo valor cambia constantemente y que hace que $e^{i\alpha t}$ promedie a cero. Ahora medimos en el laboratorio la densidad con un aparato que requiere un intervalo de tiempo

¹ Para más detalles ver: <http://geocities.com/alschairn/decoherencia/decoherenciaI.htm>

dt para hacer la medición. Pero los cambios de α ocurren muy rápidamente, tanto que en el lapso **dt**, el valor de α cambia cientos o miles de veces. Lo que el aparato medidor detectará será la densidad promediada sobre **dt**, pero por lo dicho, el promedio del término $e^{i\alpha t}$ es igual a cero y el resultado será un estado sin interferencia.

En este proceso, durante el intervalo de tiempo **dt** se ha perdido entonces la coherencia del estado. La decoherencia se debe al "ambiente" o al sistema macroscópico que interactuó con el sistema, y cuya presencia está representada aquí por el factor $e^{i\alpha t}$.

Desde mi punto de vista, la teoría de la decoherencia no resuelve el problema del rompimiento entre el micro y el macro mundo, ni el problema de la medición, porque de cualquier forma se da una discontinuidad entre los posibles estados calculados con la ecuación de Schrödinger (coherentes) y el resultado macroscópico (no coherente). Lo único que se logra es desplazar el rompimiento, pero no desaparece.



Apéndice 3: Biografía de Niels Henrik David Bohr (1885-1962)²



Figura 10. Niels Bohr
(1885-1962)

Niels Bohr empezó sus estudios en la escuela Grammelhoms. A su hermano Harald dos años menor, amigo de Bohr durante toda su vida, se le reconoció más que a Niels en la infancia por sus buenas notas, su destreza en el fútbol y en las matemáticas. Fue hasta sus estudios universitarios en la Universidad de Copenhague cuando Bohr destacó particularmente. Vivió con sus padres y sus dos hermanos desde su nacimiento en 1885, hasta 1911, año en el que se doctoró (con una tesis sobre la teoría electrónica de los metales) y viajó a Inglaterra para estudiar en el laboratorio de J. J. Thomson.

Las ideas innovadoras de Bohr no eran muy bien recibidas allí y por esa razón se trasladó invitado por Ernest Rutherford a Manchester, el lugar donde desarrollaría su modelo atómico.

En 1917 nombran a Bohr miembro de la Academia Danesa de Ciencias y poco después director del Instituto de Física Teórica de Copenhague (hoy Instituto Bohr). Como mencionamos, en 1922 le otorgaron el Premio Nobel de Física por sus trabajos de investigación sobre la estructura de los átomos y las radiaciones que se desprenden de ellos. Tras la premiación viajó por todo el mundo y consolidó a su alrededor una comunidad dedicada a la física sumamente enriquecida por todos los investigadores que le visitaban. Bohr creaba un ambiente de estudio centrado en el diálogo constante, tanto formal como informal: decía que "hay cosas tan serias, que realmente lo único que se puede hacer es bromear sobre ellas" (Bohr citado por Moshinsky, p. 38) y como dice Moshinsky, quizás entre broma y broma...la verdad se asomaría. Según Hans, uno de los hijos de Bohr, "una de las máximas favoritas de su padre era la distinción entre dos clases de verdad: trivialidades, en las que lo opuesto es evidentemente absurdo y las

² La Información sobre su biografía es muy abundante, aquí tomamos sólo la más indispensable, principalmente de <http://www.profisica.cl/personajedelmes/biografias.php?id=3>

verdades profundas, que se reconocen por el hecho de que lo opuesto también es una verdad profunda" (Hans Bohr, citado por Holton, p. 156)

Otra aportación importante de Bohr a la ciencia, además del modelo atómico y su interpretación sobre la física cuántica, fue el estudio de la fisión del Uranio que presentó en 1939. Preocupado por la explotación bélica que podía hacerse de la energía atómica, Bohr hizo muchos esfuerzos por promover su uso racional y pacífico, aunque no tuvo mucho éxito.³

En 1940, durante la ocupación de Dinamarca en la Segunda Guerra Mundial, le obligaron a permanecer en Copenhague, su situación era difícil debido a los orígenes judíos de su madre pero consiguió escapar a Suecia, junto con su esposa Margarethe y sus cinco hijos, en un bote de pescadores. Desde allí fue transportado a Inglaterra en un avión de la inteligencia inglesa. Posteriormente regresó a Copenhague, de nuevo a la dirección del Instituto de Física Teórica donde permaneció hasta su muerte, que ocurrió en 1962, un día después de T. Kuhn lo entrevistara.

³ Bohr trabajó en los Estados Unidos de América en el desarrollo de la primera bomba atómica hasta su explosión en 1945. Inquietado por el control de armas nucleares, desde 1944 intentó convencer a Churchill y Roosevelt de la necesidad de la cooperación internacional. A su regreso a Dinamarca en 1945 comenzó a desarrollar usos pacifistas de la bomba atómica y cinco años después escribía una carta pública a las Naciones Unidas defendiendo una política racional y pacífica en el uso de la energía atómica. En 1955 organizó la primera conferencia 'Átomos para la paz', y dos años después recibía el primer premio americano del mismo nombre. <http://www.profisica.cl/personajedelmes/biografias.php>.



Apéndice 4: Ejemplo de la barrera y el pozo de potencial (controversia Born-Einstein) ⁴

1) **Ejemplo de la barrera de potencial** para explicar la diferencia entre la interpretación individual ortodoxa y la interpretación de ensamble o estadística en contraste.

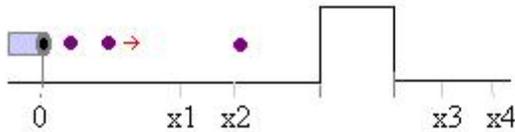


Fig.I. La figura sirve para ilustrar un sistema clásico en que varias pelotas golpean una barrera de cemento, o el caso cuántico en que un flujo de electrones se encuentra con una barrera de potencial.

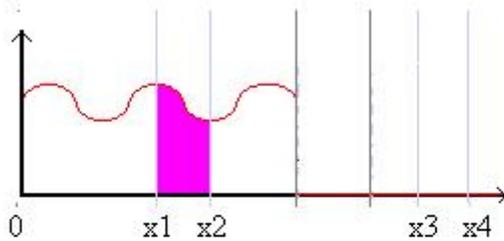


Fig.II En el caso de las pelotas, la probabilidad (área bajo la curva $|\phi|^2$) de encontrarlas después de la barrera, por ejemplo en la región entre x_3 y x_4 , es nula. $P_c = 0$

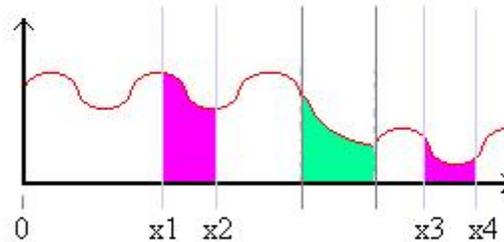


Fig.III Pero en el caso cuántico la ecuación de Schrödinger nos muestra que la probabilidad de encontrar electrones entre x_3 y x_4 es mayor que cero, y no sólo eso, también podemos encontrarlos en regiones clásicamente prohibidas, como dentro de la barrera.

$P_q > 0$

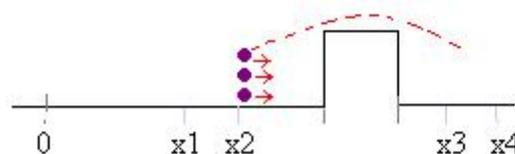


Fig.IV Las interpretaciones de ensamble dicen que lo que golpea a la barrera es un conjunto de electrones, y que la fluctuación de los electrones con mayor energía permite que alguno salte la barrera. Según la interpretación de Bohr no podemos decir cómo es la realidad antes de medir, la única descripción de la realidad es la que provee la ecuación.

⁴ Las principales fuentes de este apéndice son :
http://www.larouchepub.com/eiw/public/2005/2005_50-52/2005-51/pdf/box18_49.pdf
http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/teoria/A_Francó/cuantica/pozo/caja.htm

2) El pozo de potencial (controversia Born-Einstein)

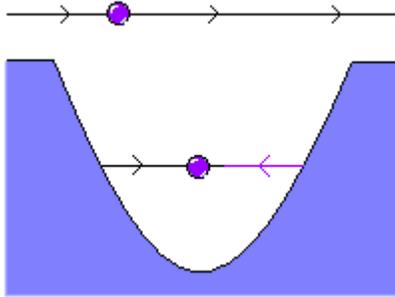


Fig. V. Ahora tenemos, en el caso clásico, una pelota que se queda rebotando dentro de un pozo y, en el caso cuántico, un pozo de potencial que confina a las partículas en un espacio acotado. Aquellas partículas con mayor energía que el pozo experimentan un cambio de velocidad cuando pasan sobre él. Esta figura muestra un potencial como los que se encuentran en la naturaleza, pero para que la solución matemática sea más sencilla, suele considerarse que el pozo es cuadrado como en las figuras siguientes.

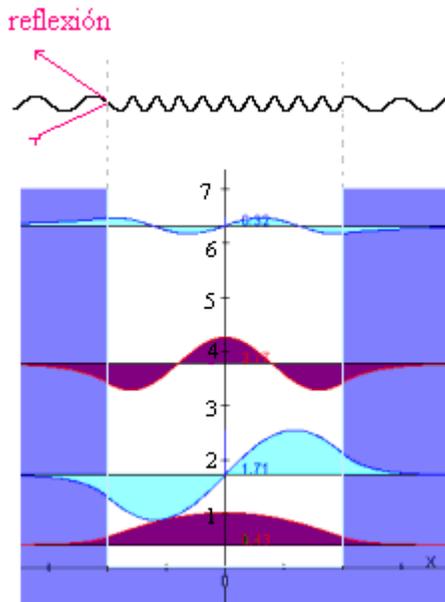


Fig. VI. Aquí se muestran las soluciones obtenidas mediante la ecuación de Schrödinger para el caso de partículas cuánticas con diferentes energías. Clásicamente las partículas no se pueden escapar del pozo, pero en el caso cuántico, como podemos observar, hay una probabilidad de penetración en las paredes cuyo valor es mayor que cero. A mayor energía, la penetración es mayor. Para la interpretación ortodoxa, la función de onda de la ecuación de Schrödinger describe una sola partícula.

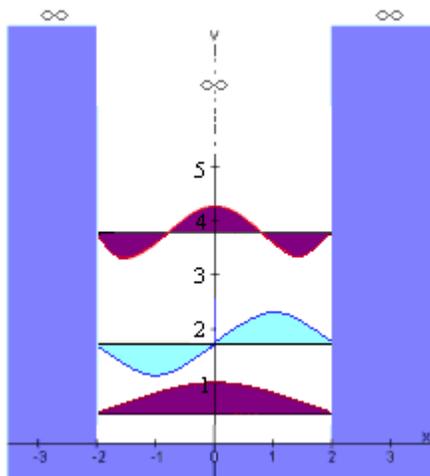


Fig. VIII. Cuando las paredes del pozo son infinitamente altas, las soluciones dentro de las paredes se anulan, y tenemos resultados iguales a los que se obtienen con una cuerda vibrante que está atada por los dos extremos. En el caso del pozo infinito tenemos que la función de corriente, esto es, la cantidad de partículas por unidad de área y por unidad de tiempo igual a cero, $j(x) = 0$. ¿Esto significa que no hay partículas o que no hay movimiento? Para Einstein lo que sucedía es que tantas partículas iban como venían anulando el flujo total.

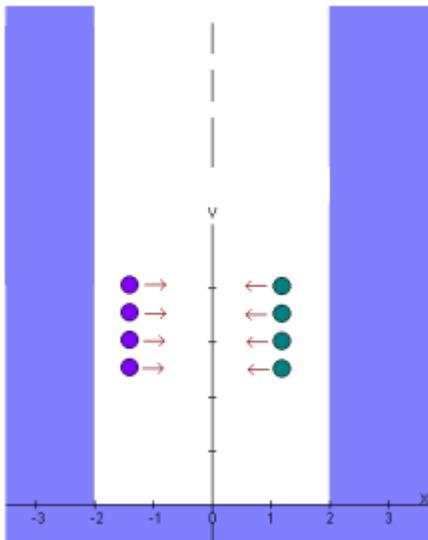


Fig.VI. Einstein sostenía que el problema del pozo de potencial podía entenderse, nuevamente, como si la ecuación de Schrödinger nos estuviera hablando de *ensambles* de partículas. Así, una parte de la solución se refiere a un subensamble de partículas que viaja del lado izquierdo al lado derecho del pozo, y la otra parte de la solución se refiere a otro subensamble que viaja en el sentido contrario. Esta explicación es compatible con lo que observamos macroscópicamente en ondas que viajan en sentido contrario y se encuentran. De manera que no hay ruptura entre el mundo macroscópico y el microscópico, y las descripciones de ambos mundos son compatibles.

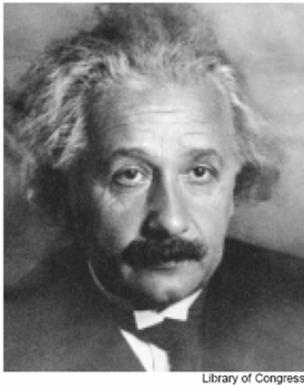


Fig. VII. A. Einstein
(1879-1955)



Fig. VIII. Max Born
(1882-1970)

Einstein publicó estas ideas acerca del problema del pozo de potencial en un libro que se editó en homenaje a su amigo Max Born, donde se presentaban también las cartas que se escribieron durante más de cuarenta años.⁵

Durante todo ese tiempo Einstein y Born sostuvieron una disputa centrada principalmente la capacidad explicativa de la mecánica cuántica y en la realidad de las propiedades que no son observadas.

Born y sus alumnos Heisenberg y Pauli, llamaron "mecánica cuántica" a la formulación de la física que habían elaborado utilizando álgebra matricial. Born sostenía que no existían principios físicos más allá del formalismo cuántico. Einstein, por el contrario, argumentaba a favor de la búsqueda de principios físicos fundamentales, como el principio de causalidad, que estaban ausentes en la mecánica cuántica. Además, en palabras de Born, "Einstein estaba firmemente convencido de que la física debía proveernos conocimiento sobre el mundo existente objetivamente... Yo [Born] he adoptado gradualmente, como resultado de experiencias en el campo de fenómenos cuánticos atómicos, el punto de vista según el cual... en un momento dado, nuestro conocimiento es sólo una cruda aproximación desde la cual, aplicando ciertas reglas como las leyes de la probabilidad de la mecánica cuántica, podemos predecir condiciones desconocidas"⁶

⁵ La correspondencia entre Born y Einstein es muy famosa, tanto que la cita más frecuente de Einstein ("Él [Dios] no juega a los dados") se encuentra en una de esas cartas.

⁶ Born citado en http://www.larouchepub.com/eiw/public/2005-51/pdf/box18_49.pdf



Apéndice 5: Soporte empírico de la EDEL: el efecto

Casimir

Un requisito primordial para sostener cualquier teoría científica es que sus hipótesis tengan soporte empírico. En el caso de la EDEL, la medición del efecto Casimir constituye evidencia empírica a favor de la hipótesis de que existe un campo de fondo que está presente en todo el espacio.

Si uno coloca en el vacío dos espejos cara a cara suficientemente cerca, los espejos experimentan una fuerza de atracción entre sí. Este fenómeno fue predicho en 1948 por el físico alemán Hendrik Casimir cuando trabajaba en los Laboratorios de Investigación de Philips en Eindhoven, Alemania. Hoy en día el fenómeno se conoce como efecto Casimir y la fuerza de atracción que se produce entre los espejos es conocida como la fuerza de Casimir; Eduardo Carletti hace una descripción de esto (Carletti, 2002, <http://axxon.com.ar/zap/c-zapping0153.htm>.)

El Dr. Shahen Hacyan y sus colegas comentan que el efecto Casimir fue por mucho tiempo una curiosidad teórica. Pero en los últimos años ha despertado un creciente interés y las aplicaciones del efecto Casimir son objeto de varios estudios actuales. (Shahen Hacyan, Rocío Jáuregui, Manuel Torres, Carlos Villareal, et al, Instituto de Física, UNAM. <http://www.fisica.unam.mx/teo/proyectos17.htm>)

A continuación transcribo el artículo de Eduardo Carletti (Carletti, 2002, <http://axxon.com.ar/zap/c-zapping0153.htm>.) donde se explica con más detalle el efecto casimir, así como las mediciones que se han realizado del mismo.



EL EFECTO CASIMIR

En los viejos días de la mecánica clásica, la idea de vacío era simple: el vacío es lo que queda si uno quita hasta la última partícula de un recipiente y reduce la temperatura al cero absoluto. Con el arribo de la mecánica cuántica, sin embargo, nuestra noción del vacío ha cambiado por completo. Todos los campos –particularmente los campos electromagnéticos– tienen fluctuaciones. En otras palabras, a cada momento el valor de un campo fluctúa alrededor de un valor determinado y constante. Aún el vacío perfecto a temperatura de cero absoluto posee campos fluctuantes conocidos como "fluctuaciones del

vacío", una energía que corresponde a la mitad de la energía de un fotón...

La Fuerza de Casimir es el efecto mecánico más famoso de las fluctuaciones del vacío. Consideremos la separación entre los dos espejos planos como una cavidad. Todos los campos electromagnéticos tienen un "espectro" que los caracteriza y que contiene diferentes frecuencias. En el vacío abierto todas las frecuencias tienen igual importancia, pero dentro de una cavidad, donde el campo es reflejado una y otra vez entre los espejos, la situación es diferente... El campo es amplificado cuando la longitud de onda corresponde a la "resonancia de cavidad"⁷ o a múltiplos enteros de ella. A otras longitudes de onda, en contraste, el campo resulta suprimido. Así, las fluctuaciones del vacío son suprimidas o amplificadas dependiendo de que sus frecuencias⁸ correspondan o no a la resonancia de la cavidad.

Una cantidad física importante cuando se habla de la Fuerza de Casimir es la "presión de radiación del campo"...Como todos los campos electromagnéticos se pueden propagar por el espacio producen presión en las superficies [sobre las que inciden]. Esta presión de radiación crece con la energía del campo electromagnético. A la frecuencia de resonancia de la cavidad, la presión de radiación dentro de la cavidad es mayor que fuera de ella y entonces los espejos son empujados hacia fuera. Fuera de resonancia, en cambio, la presión de radiación dentro de la cavidad es más pequeña que la de afuera.

El resultado es que, luego de producirse el adecuado balance de fuerzas, los componentes de atracción [dentro de la cavidad] son un poco más fuertes que los de repulsión, debido a que parte del campo no puede hacer efecto dentro de la cavidad por estar fuera de resonancia, mientras que en el exterior actúan todas las frecuencias libremente. [En otras palabras, la densidad de energía al interior de la cavidad es menor que la densidad de energía en el exterior]. Para dos espejos perfectos y planos la fuerza de Casimir, en consecuencia, es de atracción, de modo que los espejos son empujados uno contra el otro. La fuerza de Casimir es proporcional al área de los espejos y varía en proporción inversa a la cuarta potencia de la distancia entre ellos... Aparte de los parámetros geométricos, la fuerza sólo depende de valores fundamentales: la constante de Planck y la velocidad de la luz.

Aunque la Fuerza de Casimir es muy pequeña como para observarla en espejos separados por metros o centímetros de distancia, sí es posible medirla en espejos ubicados a micrones uno del otro. Por ejemplo, dos espejos con un área de 1 cm² separados por una distancia de 1 µm reciben una fuerza atractiva de Casimir de alrededor de 10⁻⁷ N, un valor cercano al peso de una gota de agua de medio milímetro de diámetro. Aunque el valor pueda parecer pequeño, a distancias de menos de un micrómetro la Fuerza de Casimir es la más fuerte que se puede producir entre dos objetos neutros. A separaciones de 10 nm, alrededor de cien veces el tamaño típico de un átomo, el Efecto Casimir produce fuerzas equivalentes a una atmósfera de presión.

⁷ La longitud de onda que corresponde a la resonancia de la cavidad es igual a la mitad de la distancia que hay entre los dos espejos.

⁸ frecuencia = $c / \text{longitud de onda}$; donde c es la velocidad de propagación de la onda.



MEDICIONES DEL EFECTO CASIMIR

Cuando se predijo el Efecto Casimir en 1948 era muy difícil medirlo con el equipo disponible en esa época. Uno de los primeros experimentos lo realizó Marcus Spaarnay en 1958 en la Philips de Eindhoven, investigando la fuerza de Casimir entre espejos metálicos fabricados de aluminio, cromo o acero. Spaarnay midió la fuerza utilizando una balanza de resortes y monitoreando la capacitancia de las placas. Para evitar que la fuerza de Casimir fuera modificada por fuerzas electrostáticas, antes de hacer la medición debían descargar los espejos cerrando circuito entre ellos. Además, Spaarnay debía asegurarse de que las caras de los espejos estuvieran perfectamente paralelas entre sí, ya que la fuerza de Casimir es extremadamente sensible a los cambios de distancia. Spaarnay hizo todo lo posible para superar estas dificultades y concluyó que sus resultados "no contradecían la predicción teórica de Casimir.

Ahora hay sofisticados equipos que han permitido estudiar mucho mejor el Efecto Casimir. La nueva generación de mediciones comenzó en 1997. Steve Lamoreaux, de la Universidad de Washington en Seattle, EE.UU., midió la fuerza de Casimir entre un lente esférico y una placa de cuarzo, ambos cubiertos por una capa de cobre y oro. El lente y la placa estaban conectados a un péndulo de torsión —una barra horizontal de torsión suspendida de un alambre de tungsteno— colocado dentro de un recipiente cilíndrico al vacío. Cuando Lamoreaux acercó la lente y la placa hasta ponerlos a unos micrones de distancia, la fuerza de Casimir acercó los objetos y causó un cambio en el recorrido del péndulo. Con este experimento encontró que las mediciones coincidían con los valores previstos por la teoría con una precisión del 5%.

Inspirados por el avance de Lamoreaux, otros investigadores probaron otras formas de medir el Efecto Casimir. Umar Mohideen y sus compañeros de la Universidad de California en Riverside, EE.UU., por ejemplo, sujetaron una esfera de poliestireno de 200 μm de diámetro a la punta de medición de un microscopio de fuerza atómica. En una serie de experimentos acercaron la esfera, cubierta a veces de aluminio y otras de oro, a alrededor de 0,1 μm de un disco plano, también cubierto de esos metales. La atracción resultante entre la esfera y el disco fue monitoreada por la desviación de un haz de láser. Los investigadores lograron mediciones de la Fuerza de Casimir dentro del 1% de los valores esperados teóricamente.

Thomas Ederth, del Royal Institute of Technology de Stockholm, Suecia, utilizó también un microscopio de fuerza atómica para estudiar el Efecto Casimir. Midió la fuerza entre dos cilindros cubiertos de oro colocados a 90° uno del otro a una distancia de apenas 20 nm. Los resultados que obtuvo coinciden con la teoría con sólo 1% de variación.

Muy pocos experimentos recientes han medido la fuerza de Casimir utilizando la disposición original de dos espejos planos, paralelos entre sí. La razón es que mantener los espejos perfectamente paralelos durante el experimento es sumamente difícil de lograr. Es mucho más fácil colocar una esfera cerca de un espejo debido a que la separación

entre ambos objetos es, simplemente, la distancia más corta entre ellos. El único problema al usar una esfera es que los resultados de los cálculos de la fuerza de Casimir no son tan exactos como cuando se usan espejos planos. Particularmente, se ha debido suponer que las contribuciones a la fuerza entre la esfera y la placa en cada punto son completamente independientes. Esto es cierto sólo si el radio de la esfera es mucho mayor que la distancia entre ella y la placa.

El único experimento reciente que ha reproducido la distribución original de Casimir de dos espejos planos paralelos fue realizado por Gianni Carugno, Roberto Onofrio y colaboradores de la Universidad de Padua en Italia, quienes midieron la fuerza entre una placa rígida cubierta de cromo y la superficie de una placa móvil hecha del mismo material, separadas por distancias entre 5 y 3 μm . Los investigadores hallaron que la fuerza de Casimir medida estaba dentro del 15% de los valores teóricos esperados. Esta aproximación tan pobre refleja las dificultades técnicas que involucró el experimento.

Cuando se estudia el Efecto Casimir, el problema es que los espejos reales no se parecen en nada a la superficie lisa y perfectamente plana que consideró Hendrik Casimir originalmente. En particular, los espejos reales no reflejan todas las frecuencias a la perfección, sino que reflejan bien unas y muy mal otras. Además, todos los espejos se vuelven transparentes a las frecuencias muy altas. Para calcular la fuerza de Casimir se deben tener en cuenta coeficientes de reflexión de los espejos que dependen de la frecuencia, un problema que abordó por primera vez Evgeny Lifshitz a mediados de los 50s y luego Julian Schwinger y otros.

Otro problema del cálculo de la Fuerza de Casimir que se debe esperar en un sistema real es el hecho de que los experimentos nunca se realizan al cero absoluto —como fue definido originalmente en los cálculos de Casimir— sino a temperatura ambiente. Esto causa que —además de las del vacío— entren en juego las fluctuaciones térmicas. Estas fluctuaciones térmicas pueden producir su propia presión de radiación y crear una fuerza de Casimir mayor a la esperada. Por ejemplo, la fuerza de Casimir entre dos espejos planos a 7 μm uno de otro es el doble a temperatura ambiente que al cero absoluto. Afortunadamente, las fluctuaciones térmicas a temperatura ambiente sólo son importantes si la separación es de más de 1 μm , ya que con una distancia menor la longitud de onda de las fluctuaciones térmicas es demasiado grande para entrar en la cavidad.

Aunque la dependencia de la temperatura de la Fuerza de Casimir aún no ha sido estudiada en detalle experimentalmente, debe ser incluida en los cálculos de la fuerza en separaciones mayores de 1 μm . Muchos investigadores han abordado el cálculo en espejos de reflexión perfecta, incluyendo a Lifshitz y Schwinger en los 50s. El tema fue examinado más recientemente por Michael Bordag en la Leipzig University, Bo Sernelius en la Linköping University de Suecia, Galina Klimchitskaya y Vladimir Mostepanenko en la Universidad de Paraíba en Brasil y por Astrid Lambrecht y Serge Reynaud, del Laboratoire Kastler Brossel, Université Pierre et Marie Curie, de París, Francia. La dependencia de la temperatura de la fuerza de Casimir ha sido causa de fuertes debates en la comunidad científica. Varias de las contradicciones que presentaba la discusión se han ido resolviendo, lo cual ha dado un motivo adicional para que se realice una observación

experimental de la influencia de la temperatura en la Fuerza de Casimir.

El tercer y definitivo problema en el cálculo de la Fuerza de Casimir es que los espejos reales no son perfectamente lisos. La mayoría están hechos con una base cubierta de una capa delgada de metal, aplicada por una técnica llamada "sputtering"⁹. Sin embargo, este proceso produce capas con rugosidades de 50 nm. Aunque esta rugosidad es invisible al ojo, afecta enormemente las mediciones de la fuerza de Casimir, que es muy sensible a los pequeños cambios en la distancia.



Apéndice 6: Ecuación de Schrödinger y de difusión

Ecuación de Schrödinger

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

Ecuación de difusión

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2}$$

Ambas ecuaciones pueden verse como ecuaciones del tipo:

$$\mathbf{A} \frac{\partial \Phi(x,t)}{\partial t} = \mathbf{B} \frac{\partial^2 \Phi(x,t)}{\partial x^2} + \mathbf{C} \Psi(x)$$

Pero en la ecuación de Schrödinger el coeficiente **A** es imaginario y en la ecuación de difusión **A** es real. Esto implica que las soluciones de cada una de las ecuaciones, y su significado físico, son muy diferentes. La similitud entre las ecuaciones es formal y por eso se dice que el argumento es meramente formal también.

⁹ Se utiliza el término en inglés porque todavía no se ha acuñado un término que le corresponda en castellano