

HACIA UN ANÁLISIS DEL DETERMINISMO EN LA FÍSICA CUÁNTICA

JUAN JACOBO IBARRA SANTACRUZ

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE HUMANIDADES Y FILOSOFÍA
PROGRAMA DE LICENCIATURA EN FILOSOFÍA Y LETRAS
SAN JUAN DE PASTO
2015**

HACIA UN ANÁLISIS DEL DETERMINISMO EN LA FÍSICA CUÁNTICA

JUAN JACOBO IBARRA SANTACRUZ

Trabajo de Grado para optar el título de Licenciado en Filosofía y Letras

Asesor:

Mg. RODRIGO CUÉLLAR JIMÉNEZ

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE HUMANIDADES Y FILOSOFÍA
PROGRAMA DE LICENCIATURA EN FILOSOFÍA Y LETRAS
SAN JUAN DE PASTO**

2015

“Las ideas y conclusiones aportadas en el siguiente trabajo de grado son
responsabilidad exclusiva de su autor”

Artículo 1° del acuerdo no. 324 de octubre 11 de 1966, emanado del Honorable
Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación:

Jurado

Jurado

San Juan de Pasto, diciembre de 2015



Universidad de Nariño
FACULTAD DE CIENCIAS HUMANAS

ACUERDO No. 020
(22 DE FEBRERO DE 2016)

Por el cual se otorga la distinción de LAUREADO a un Trabajo de Grado.

EL CONSEJO DE FACULTAD DE CIENCIAS HUMANAS DE LA UNIVERSIDAD DE
NARIÑO,

En uso de sus atribuciones legales y estatutarias y,

CONSIDERANDO:

Que mediante Acuerdo No. 332 del 1ro. de noviembre de 2005, el Consejo Académico Universitario, reglamentó y unificó los criterios y puntajes de la evaluación de los trabajos de grado de los diferentes programas de la Universidad de Nariño.

Que según el Acuerdo mencionado, es de competencia del Consejo de Facultad otorgar la distinción de LAUREADO o MERITORIO a los trabajos de grado, según corresponda.

Que mediante proposición No. 007 de Febrero 18 del año en curso, el Comité Curricular y de Investigación del Departamento de Humanidades y Filosofía, solicita se otorgue la distinción de LAUREADO al Trabajo de Grado titulado: "HACIA UN ANÁLISIS DEL DETERMINISMO EN LA FÍSICA CUANTICA", presentado por el estudiante JUAN JACOBO IBARRA SANTACRUZ de la Licenciatura en Filosofía y Letras, quien obtuvo 100 puntos, que corresponden a la calificación de LAUREADA, según acta de sustentación.

CALIFICACIÓN DEL TRABAJO ESCRITO SOBRE 60 PUNTOS

JUAN BAUTISTA FLÓREZ- GERMÁN RAMOS Z.

		P. MÁX.	P. ASIG.	P. ASIG.
1.	Cumplimiento de Objetivos	10	10	10
2.	Metodología Utilizada	10	10	10
3.	Análisis, alcance y validez de los resultados	10	10	10
4.	Importancia del tema	10	10	10
5.	Presentación general (Revisión de Literatura, metodología, cuadros, diagramas y figuras, redacción general, normas de redacción técnica)	10	10	10
			60 Puntos	60 Puntos
	PROMEDIO	60	PUNTOS	

SUSTENTACIÓN SOBRE 40 PUNTOS

		P. MÁX.	P. ASIG.	P. ASIG.
1.	Dominio del tema	30	30	30
2.	Exposición del trabajo	10	10	10
			40	40
	PROMEDIO		40 PUNTOS	

TOTAL 100 PUNTOS

Que el Comité Curricular y de Investigaciones solicitó a los Jurados Evaluadores los conceptos que argumenten y justifiquen la solicitud presentada ante el Consejo de Facultad de Ciencias Humanas.

Que en virtud de lo anterior,

ACUERDA:

ARTICULO PRIMERO:

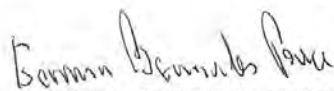
Otorgar la distinción de LAUREADO al Trabajo de Grado titulado: "HACIA UN ANÁLISIS DEL DETERMINISMO EN LA FÍSICA CUANTICA", presentado por el estudiante JUAN JACOBO IBARRA SANTACRUZ de la Licenciatura en Filosofía y Letras, quien obtuvo 100 puntos, que corresponden a la calificación de LAUREADA, según acta de sustentación.

Acuerdo No. 020, Por el cual se otorga la distinción de LAUREADO a un Trabajo de Grado.

ARTICULO SEGUNDO: OCARA, Facultad de Ciencias Humanas, Departamento de Humanidades y Filosofía, anotarán lo de su cargo.

COMUNIQUESE Y CUMPLASE.

Dado en San Juan de Pasto, a los 22 días del mes de Febrero de 2016.


GERMAN BENAVIDES PONCE
Presidente


MAGALY ZARAMA ORDOÑEZ
Secretaría

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN-----	10
PARTE I: DESARROLLO HISTÓRICO Y CONSOLIDACIÓN DEL DETERMINISMO DESDE LA ANTIGÜEDAD HASTA EL SIGLO XIX-----	15
Capítulo 1: El determinismo en la Antigüedad -----	15
1.1.1 La filosofía presocrática y la búsqueda de una explicación cósmica -----	15
1.1.2. Leucipo, Demócrito y la primera formulación de una teoría atómica y mecanicista -----	19
1.1.3. Epicuro, Lucrecio y el desarrollo del atomismo antiguo -----	25
Capítulo 2: Consolidación del determinismo en la física clásica -----	33
1.2.1. El resurgir del legado griego y su influencia en la visión científica clásica --	33
1.2.2. Descartes, Spinoza y el surgimiento de la filosofía mecanicista -----	37
1.2.3. Newton, la mecánica clásica y la fundamentación científica del determinismo -----	44
1.2.4. La consolidación de un determinismo rígido -----	51
1.2.5. El determinismo y los desarrollos en la física clásica -----	55
PARTE II: EL DETERMINISMO Y LA MECÁNICA CUÁNTICA -----	67
Capítulo 1: Origen y desarrollo de la mecánica cuántica: objeciones a la visión determinista del mundo -----	67
2.1.1. Max Planck y Albert Einstein: del cuanto de energía al cuanto de luz ----	67
2.1.2. En busca de la estructura atómica de la materia -----	73
2.1.3. La dualidad onda-partícula: nuevos resultados para un viejo debate -----	77
2.1.4. Werner Heisenberg y Erwin Schrödinger: mecánica matricial y mecánica ondulatoria, dos perspectivas matemáticas ante una sola realidad -----	81

2.1.5. Una indefinición inherente a la naturaleza: el principio de incertidumbre de Heisenberg -----	87
--	----

Capítulo 2: El determinismo y el problema de la medición en física cuántica ----	95
--	----

2.2.1. Una imagen difusa de los sistemas cuánticos: la superposición de estados - -----	95
--	----

2.2.2. Una salida abrupta de la superposición: el colapso de estado -----	102
---	-----

2.2.3. La medición como una perturbación inevitable del estado de los sistemas cuánticos -----	110
--	-----

2.2.4. Consideraciones complementarias sobre la probabilidad en la física cuántica y la cuestión del determinismo -----	121
---	-----

Capítulo 3: El problema del determinismo en las diferentes interpretaciones de la mecánica cuántica y sus alternativas de solución -----	126
--	-----

2.3.1. La interpretación de Copenhague y el problema del determinismo -----	127
---	-----

2.3.2 Einstein, Podolsky y Rosen: primeras objeciones a la interpretación de Copenhague -----	138
---	-----

2.3.3. El determinismo en las distintas interpretaciones de la mecánica cuántica después del debate EPR/Copenhague: posibles alternativas de solución -----	156
---	-----

CONCLUSIONES -----	191
--------------------	-----

BIBLIOGRAFÍA -----	231
--------------------	-----

LISTA DE IMÁGENES

Figura 1. El experimento de la doble rendija

RESUMEN

El determinismo constituye un principio imprescindible para fundamentar el conocimiento científico; si no se presupusiera la existencia de regularidades que estructuran el desenvolvimiento de los procesos del mundo sería muy difícil concebir la posibilidad de conocerlo por medio de principios explicativos generales. Aunque planteado de manera latente y embrionaria desde los griegos, se hizo explícito sólo hasta la Edad Moderna, época en la que científicos como Galileo y filósofos como Descartes plantearon un determinismo riguroso que luego se fortaleció con las síntesis y generalizaciones de la mecánica clásica Newtoniana, cuyas tres leyes se conjeturaron extensivas a todo el Universo. A partir del siglo XX, el advenimiento de la mecánica cuántica hizo que se abrieran grietas en el determinismo formulado en el sentido clásico. Los descubrimientos al interior de la esfera atómica de la materia sacaron a la luz rasgos del comportamiento de la naturaleza inimaginables en el contexto de la mecánica clásica. Aunque es notable que los avances en la mecánica cuántica han conmovido la noción determinista que se había formado sobre la base de la mecánica clásica, vale la pena hacer un análisis para establecer si el determinismo es incompatible con la probabilidad esencial de la cuántica, si se ve refutado o si necesita ser replanteado para estar a la altura explicativa de los descubrimientos realizados por los estudios al interior del átomo.

Palabras clave:

- Determinismo
- Probabilidad
- Causalidad
- Casualidad
- Física clásica o mecánica clásica
- Física cuántica o mecánica cuántica

ABSTRACT

Determinism constitutes an essential principle to base scientific knowledge; if it doesn't presuppose the existence of regularities that give structure to the development of world's processes it would be very hard to conceive the possibility of know him within general explanatory principles. although set out in a latent and embryonic way since greeks, it made explicit only until Modern Age, age in which scientists as Galileo and philosophers as Descartes suggested a rigorous determinism which then strengthened with the synthesis and generalizations of Newtonian classical mechanics, which three laws conjectured applicable to the entire universe. Since XX Century, the coming of quantum mechanics made that open cracks in the determinism formulated in the classic sense. The discoveries into the atomic sphere of matter brought up to light characters of nature's behavior unimaginable in the context of classical mechanics. Although is notable that advances in quantum mechanics had unsettled the deterministic notion that had formed under the base of classical mechanics, be worth it an analysis to set up if determinism is incompatible with essential probability of quantum mechanics, if it is rejected or if it needs to be reconsidered to be at the height of discoveries made by the studies into the atom.

Keywords

- Determinism
- Probability
- Causality
- Chance
- Classical Physics or classical mechanics
- Quantum physics or quantum mechanics

INTRODUCCIÓN

La física cuántica emergió a comienzos del siglo XX como un logro científico revolucionario en varios sentidos. Puede decirse en primer lugar que la develación del mundo cuántico ante los ojos de la ciencia ha repercutido en portentosas aplicaciones de la vida práctica. Absolutamente nada de lo que hace parte del acelerado desarrollo tecnológico de nuestros días y que se manifiesta en una plétora diversa de aparatos electrónicos, sería posible si la ciencia no hubiera aprendido a aprovechar el comportamiento del microcosmos en pro de la producción; más del 30% del Producto Interno Bruto de países como los Estados Unidos se nutre de dichas aplicaciones. También el campo de la medicina se ha valido del conocimiento del microcosmos para elaborar tecnologías encaminadas al tratamiento de ciertos padecimientos. La computación es un área cuyo progreso hunde sus raíces en el fértil terreno de la física cuántica con resultados cada vez más prometedores. De lo anterior se infiere que con la introducción de la ciencia en los niveles cuánticos de la materia ha provisto a la humanidad de un gran potencial creativo y productivo, lo cual implica al mismo tiempo una gran responsabilidad para que dichos progresos florezcan en pro de la humanidad en su conjunto.

Aunque lo anterior hace entrever que la física cuántica constituye un importantísimo acontecimiento de la época contemporánea, lo que constituye el núcleo de la reflexión inmersa en el presente trabajo son las implicaciones también revolucionarias que esta rama de la ciencia ha traído para el pensamiento y la imagen que los seres humanos nos hacemos sobre el mundo. La física cuántica representa uno de los logros más importantes de la mente humana; su aparición y desarrollo ha ensanchado las fronteras del conocimiento permitiendo al ser humano introducirse en niveles más vastos y profundos del universo. Los secretos que ha revelado y los problemas que ha planteado tienen que ver con la estructura más profunda de la naturaleza de la realidad. Desde la Antigüedad se había

planteado ya la necesidad intelectual de descifrar la arquitectura interna de la materia, pero sólo desde comienzos del siglo pasado, las agudas intuiciones de los antiguos comenzaron a florecer sobre el terreno de la ciencia contemporánea. Alrededor de mediados de la década de los veinte el siglo pasado se consolidó la física cuántica como un poderoso formalismo matemático útil para la investigación de procesos físicos cuyo comportamiento resultaba inexplicable en el contexto teórico de la física clásica de Newton y Maxwell. En el nivel atómico y subatómico de la materia las herramientas formales que la física clásica había elaborado para el estudio del mundo macroscópico resultaron insuficientes y la física cuántica se erigió como el instrumento competente para asumir el reto de estudiar la materia ultramicroscópica. Desde entonces no ha cabido duda acerca de su enorme potencial empírico, incrementándose el mismo con el tiempo y proporcionando resultados cada vez más fructuosos. Sin embargo, desde entonces la física cuántica ha suscitado una serie de problemas interpretativos, de tal forma que aun hoy existe un álgido debate en torno a su significado físico y filosófico. El cuadro general del mundo que se había erigido sobre la base de los logros de la física clásica comenzó a ser puesto en entredicho por los desarrollos de esta ciencia del microcosmos, permaneciendo abierta la solución a dichos problemas interpretativos aún hasta nuestros días. Uno de esos problemas interpretativos suscitados a la luz de la física cuántica orbita alrededor del determinismo, un presupuesto fundamental del cuadro general del mundo sostenido sobre la base de los logros de la física clásica.

El determinismo se había postulado como un principio insoslayable que atribuía un carácter universal a la causalidad. De acuerdo con la física clásica, resultaba perfectamente legítimo sostener que el universo funciona de tal manera que el estado presente de cada uno de sus procesos constitutivos está determinado causalmente por algún estado pasado y a su vez determina causalmente su estado futuro. Algunos científicos y filósofos llevaron este principio al extremo y comenzó a extenderse la sensación de que todo en el universo se encuentra

determinado de una manera rígida de tal modo que todo cuanto sucede, lo hace de manera necesaria e inevitable, llevando a menoscabar el papel de las contingencias y casualidades en el devenir de los procesos del mundo. Así, la mecánica clásica fundamentaba un rígido cumplimiento del determinismo: las condiciones de un sistema físico, las leyes que rigen su comportamiento, fijan rigurosamente las condiciones en que se encontrará ese mismo sistema en cualquier otro instante.

Pero con la introducción del ojo de la ciencia en los niveles atómicos y subatómicos del cosmos, tal presupuesto comenzó a parecer un tanto ingenuo; la naturaleza de la realidad cuántica hizo explícita la insuficiencia de la idea de que el comportamiento de los procesos físicos describe un rígido proceder inevitable y prefijado por leyes estrictas y que actúan de manera inmutable. Los desarrollos en el campo de la microfísica y, sobre todo, con base en algunos postulados interpretativos que se plantearon desde los orígenes de esta ciencia, la cuestión del determinismo comenzó a ceder. En el contexto de descubrimientos como la discontinuidad cuántica, la dualidad onda partícula, el carácter probabilístico del comportamiento de los sistemas cuánticos, el principio de incertidumbre de Heisenberg, etc. algunos grandes científicos como Niels Bohr, Werner Heisenberg y Max Born, entre otros, comenzaron a sugerir la bancarrota del determinismo y la causalidad en la esfera cuántica de la realidad física. Por ejemplo, sobre la base del supuesto de que los sistemas cuánticos no avanzan en un único sentido preestablecido, sino en virtud de un carácter probabilístico, se comenzó a sugerir que no existe una regularidad intrínseca en la evolución temporal de los sistemas; y, sobre la base del principio de incertidumbre de Heisenberg, que postula la imposibilidad simultánea de ciertos pares de propiedades constitutivas del estado un sistema, se comenzó a sugerir la imposibilidad de que exista una interconexión coherente entre los estados pasado, presente y futuro de las sistemas cuánticos.

Cuestiones como estas dieron lugar a suposiciones de un agrietamiento insalvable del determinismo fundamentado sobre la base de la física clásica. Sin embargo, aunque dichas grietas se hacen evidentes para la visión determinista clásica, hace falta preguntarse si los desarrollos en el seno de la física cuántica hacen imposible el sostenimiento del determinismo en general o si marcan los límites que determinan la insuficiencia del determinismo clásico en particular planteando la necesidad de desarrollar una nueva noción de determinismo a la luz de los desarrollos aparejados a la física del microcosmos. En todo caso, tenemos ante nuestra mirada elementos que nos exigen una reconfiguración de ciertas nociones que integran nuestra concepción general sobre la naturaleza de la realidad, planteándose la exigencia de una investigación más profunda sobre la causalidad y el determinismo, concebido este último como su universalización. Y así, en el contexto de la física cuántica, el problema del determinismo se plantea en términos de una disyuntiva: abandonar por completo la categoría de determinismo que se había erigido desde la fundamentación de la física clásica declarándola obsoleta o aceptar las limitaciones de la misma para asumir la tarea de despojarla de su contenido parcialmente falaz y enriquecerla con el contenido de la nueva ciencia. Si se asume la segunda vía planteada, el problema del determinismo ya no se plantea en términos del dilema de si el mismo es un rasgo presente o ausente en los procesos cuánticos, sino como el problema de esclarecer las formas complejas y específicas en qué se manifiesta dentro de los procesos cuánticos.

En el presente trabajo se busca contribuir a la resolución de dicho problema teórico. Para lograr tal objetivo se ha realizado un esbozo histórico que dibuja el camino a través del cual se ha ido consolidando la visión determinista del mundo hasta llegar al punto de la historia de la ciencia en el que esta visión se ve controvertida. El trabajo contiene dos partes fundamentales: en la primera se muestra cómo el determinismo se llegó a constituir como una sólida visión del mundo desde su estado embrionario en el contexto de la incipiente ciencia de la

Grecia Antigua hasta su sólida fundamentación científica en el contexto de la física clásica después de la Revolución científica de los siglos XVI y XVII; en la segunda parte del trabajo se aborda el problema del determinismo en el contexto de la física cuántica, procurando mostrar los aspectos esenciales de esta ciencia en los que se hace patente el cuestionamiento de dicha noción. En la misma parte se abordan también los principales enfoques interpretativos procurando señalar cuáles son las alternativas más viables que apuntan a su solución.

Así, aunque ha pasado más de un siglo desde que comenzó a gestarse la revolución cuántica, sus ecos no dejan de resonar hasta nuestros días. Vista en retrospectiva, la física cuántica representa uno de los momentos más importantes del desarrollo de la ciencia física, pero también uno de los momentos decisivos para el desarrollo del pensamiento científico en general. Junto a otros desarrollos en el campo de la física del siglo XX, la física cuántica contribuyó a marcar los límites de efectividad a los cuales debía circunscribirse la física clásica, dilatando, simultáneamente, las fronteras de la mente humana para sumergirse en niveles de la realidad más profundos de los que anteriormente estaba habituada a imaginar y comprender. En el presente trabajo se va a analizar lo que sucede con la visión determinista del mundo en el contexto de esta revolución. Naturalmente, el presente tema constituye una cuestión abierta que necesita ser analizada con mayor profundidad para podernos ir aproximando a respuestas cada vez más satisfactorias. Esta investigación, lejos de pretender plantear una respuesta definitiva, busca enriquecer el debate sin negarse a la posibilidad de ofrecer algunas luces interpretativas que motiven ulteriores investigaciones concernientes a la interesante e importantísima cuestión del determinismo en la física cuántica. Se espera, en consecuencia, que el lector encuentre interesante el contenido de este trabajo y fomente su espíritu crítico y creador para continuar con la indagación en torno a este tema fundamental para la historia y la filosofía de la ciencia.

PARTE I:
DESARROLLO HISTÓRICO Y CONSOLIDACIÓN DEL DETERMINISMO DESDE
LA ANTIGÜEDAD HASTA EL SIGLO XIX

Capítulo 1
El determinismo en la Antigüedad.

1.1.1. La filosofía presocrática y la búsqueda de una explicación cósmica.

Una de las ideas más importantes que la filosofía griega antigua legó a la investigación científica de la posteridad fue la de que existen ciertas regularidades que posibilitan el orden en el universo, atribuyéndole a éste una forma de *cosmos* y no de *caos*. La búsqueda de dichas regularidades en la *physis* o naturaleza se vio reflejada en la búsqueda del *arké* o principio constitutivo de todas las cosas, un supuesto elemento primigenio que subsistía a pesar de todos los cambios experimentados por la materia. Tal idea constituía una intuición primaria que servía para explicar los fenómenos observados que ostentaban una sucesión regular en el tiempo, como para satisfacer el supuesto intelectual de los griegos antiguos de que la totalidad del mundo debe estar caracterizada por la armonía. Esto resulta significativo, dado que en la noción de *cosmos* perseguida por los antiguos naturalistas griegos se encuentran los gérmenes de la cosmovisión determinista. Los filósofos presocráticos se sumergieron en la búsqueda de uno o cuatro principios materiales constitutivos de todas las cosas, en virtud de los cuales se explicara el comienzo del mundo y el orden de sus cambios. La vasta multiplicidad de formas de existencia contemplada en el mundo se concebía, entonces, como el resultado de las diferentes configuraciones, conformaciones, disociaciones, interacciones de esa unidad o pluralidad de elementos materiales que, dotados de un impulso anímico, desempeñan el rol causal para todo lo que existe y todo lo que sucede.

Tales de Mileto (624-546 a. de C.), el primer filósofo de occidente reconocido por la historia, fue un sagaz investigador de la naturaleza, un gran matemático y uno de los impulsores del surgimiento de la ciencia natural y la filosofía en la Antigüedad. Por la historiografía se sabe que predijo un eclipse solar y que advirtió la posibilidad de conocer la altura de una pirámide a través de la medida de la longitud de la sombra de la misma, método utilizado mucho tiempo después para medir la altura de las montañas de la Luna. Además, es seguro que Tales estuvo en contacto con las matemáticas y la geometría de egipcios y babilonios y que, aprendiendo a manipular la ciencia de los números por cuenta propia, fue quien primero logró demostrar teoremas geométricos, que serían luego sistematizados por Euclides y que constituirían un sustrato para la revolución que Newton propició a través del cálculo. Tales sostuvo que el principio determinante y fundamental de todas las cosas debe ser el agua, un elemento húmedo primordial a partir del cual se derivan todos los modos particulares en que la naturaleza existe, como la tierra que habría surgido mediante un proceso natural, como la sedimentación observada en las aguas de los ríos. Resulta precisa la afirmación que hace Carl Sagan para evaluar las ideas de este filósofo: “Lo importante no es que la conclusión de Tales fuera correcta o no, sino el método utilizado: El mundo no fue hecho por los dioses, sino por la labor de fuerzas materiales en interacción dentro de la naturaleza”¹. La naturaleza, se explica por medio de sus causas intrínsecas, sin necesidad de recurrir a fuerzas exteriores.

De Anaximandro de Mileto (610-545 a. de C.), discípulo de Tales, se ha comentado que ya realizaba experimentos científicos de manera consciente y sistemática para dar razón de los cambios experimentados en el cielo a través del tiempo. Consistió en examinar el movimiento de la sombra proyectada por una vara vertical y en la determinación precisa de la duración del año y los periodos estacionarios que lo componen. También elaboró un reloj solar, un mapa del

¹ SAGAN, Carl. Cosmos. Barcelona: Editorial PLANETA, 1992. p. 179.

mundo y esbozó la idea de que la Tierra no se halla sostenida por nada sino que se encuentra flotando suspendida debido a la equidistancia que la separa de todos los puntos del universo. Propuso también la idea de que los seres vivos encuentran su origen en un larguísimo sendero de cambios que van desde formas menos complejas a otras más complejas. La vida es un resultado de las incesantes transformaciones y, junto a todas los demás ejemplares de existencia que ostenta el mundo, encaja en el ciclo eterno por medio del que surgen las múltiples y sucesivas determinaciones del cosmos. No existe una causa final, el principio único, constitutivo de todas las cosas, debía ser *lo apérion* que en griego, designa lo ilimitado o infinito. Se trata de un principio abstracto elaborado por Anaximandro, indefinido e indeterminado tanto en cantidad como en cualidad, pero que por fuerza de la necesidad va adquiriendo determinaciones específicas, de modo que todo cuanto sucede en el universo y todas las formas existentes derivan de él y son a través de él; este principio abarca todas las formas existentes pero resulta irreductible a ninguna de tales manifestaciones particulares.

Otros filósofos, como Heráclito de Éfeso (535-484 a. de C.) postularon incluso la existencia de una fuerza universal que sería la causa fundamental del orden de los cambios que experimenta continuamente la naturaleza y responsable, en última instancia, de que el universo pueda considerarse auténticamente como un cosmos y no como un caos. Tal fuerza cósmica fue designada por Heráclito con el nombre de *logos*, que en griego se traduce como inteligencia, razón o sentido. Sin duda, Heráclito fue el filósofo de la Antigüedad que más agudamente examinó el problema del movimiento y del cambio, llegando a teorizar sobre el carácter íntimamente contradictorio de todo lo existente. Todo en el mundo deviene y consiste en una unidad específica entre ser y no ser. En la filosofía de Heráclito, se concibe al universo como un todo en continuo dinamismo que no requiere de impulsos mecánicos para experimentar cambios, el cambio mismo se concibe como una propiedad inherente y fundamental de la materia, se encuentra sujeto de manera ineludible al impulso ordenador del logos. Sin embargo, en Heráclito

también se aludía a la existencia de una justicia cósmica o *dike* que constituía, según el efesino, el medio a través del cual se resolvía la dialéctica entre la unidad y lucha de contrarios, ley fundamental del devenir de las cosas y premisa básica para explicar el equilibrio subyacente a los cambios de la *physis*.

En su búsqueda de los principios fundamentales que expliquen la forma cómo se comporta la naturaleza, los griegos de la Antigüedad se iban encaminando hacia la visión determinista del mundo que más tarde, se consolidaría sobre otras bases. Tales, Anaximandro y Heráclito estaban aún imbuidos por ciertos rezagos mitológicos que se evidenciaban en su concepción hilozoista de la naturaleza que les llevaba a concebir a toda la materia como si estuviera dotada de un impulso vital que dinamizaba los procesos naturales sin necesidad de impulsos exteriores. No obstante, esos filósofos resultan, entre varios otros, protagonistas de aquella revolución intelectual del viejo mundo y partícipes directos del gran salto que se dio del mito al logos. Sin embargo, no sería posible llegar a esclarecer la forma que adoptó ese determinismo embrionario en la Antigüedad sin detenerse antes a considerar lo que pensaron los atomistas. Gracias a sus mentes lógicas y agudas, concibieron la forma más elaborada de ese determinismo germinal cuya semilla fue sembrada hace alrededor de 2.500. A lo largo del siguiente esbozo se muestra cómo, de toda esa investigación naturalista que floreció en la Antigua Grecia, en la perspectiva de los atomistas, se encontraba formulada la visión determinista de la Antigüedad.

1.1.2. Leucipo, Demócrito y la primera formulación de una teoría atómica y mecanicista

“La verdad está enterrada en un lugar muy profundo”. Demócrito

La escuela atomista fue fundada por Leucipo de Mileto (se presume que pudo haber nacido también en Elea, al sur de Italia, o en Abdera, en la región griega de Macedonia oriental) en el siglo V a. de C. A él se le debe el concepto de átomo que se traduce en griego como aquello “que no puede cortarse”. Para Leucipo, todo lo existente se compone de partículas indivisibles llamadas átomos que se encuentran en movimiento, se unen y se separan, para conformar los diferentes cuerpos. Según este filósofo, nada procede de la nada, y todo posee una causa natural que explica cada cambio en la naturaleza. Los sucesos espontáneos son aparentes, pues detrás de ellos subyacen causas naturales que los explican. Así, como todo en el universo posee una causa, y como todo lo que hay en el mundo son átomos en movimiento que se unen y se separan, entonces, cada cambio del universo, toda la variedad y riqueza de formas de existencia sería tan sólo la infinita forma en cómo se pueden integrar y relacionar mecánicamente los átomos constitutivos del universo. Se trata, pues, de un reduccionismo a materia y movimiento lógicamente coherente para sustentar los procesos observados en la naturaleza.

Fue Demócrito de Abdera (460-370 a. de C.), discípulo de Leucipo, quien desarrolló los postulados fundamentales de la escuela atomista con mayor profundidad. Demócrito atribuyó ciertas diferencias a la infinita cantidad de átomos en el universo sugiriendo que ellas se evidencian en la forma, en el orden y en las diversas posiciones que pueden adoptar las diferentes configuraciones atómicas. Demócrito se fue acercando a la hipótesis de que al moverse, las partículas atómicas van entrando progresivamente en diferentes disposiciones, encajando unas partículas con otras, y separándose unas de otras, de acuerdo a sus

caracteres compatibles o incompatibles, estructurándose en cuerpos compuestos, como legos que se juntan por la fuerza de una necesidad cósmica en entidades ordenadas y consistentes. Existen dos tipos de movimiento atómico para Demócrito que deben tenerse en cuenta. Por un lado, tenemos el movimiento rectilíneo por medio del cual los átomos colisionan entre sí, y por otro lado tenemos un movimiento de carácter circular que sería como una especie de torbellino o vórtice cósmico que conlleva al universo a un constante ciclo de transformaciones. Paul Cartledge, afirma que para Demócrito, a los átomos les es inherente el movimiento; su dinamismo hace que se desplieguen hacia diferentes posibilidades determinadas por las colisiones mecánicas y por las diferentes configuraciones y disposiciones de los átomos. Todo esto surge mediante la acción de la necesidad natural que consiste en un impulso inevitable de las cosas hacia la adquisición de determinaciones transitorias concretas. La necesidad es la regla universal que determina que un conjunto de átomos termine por conformar entidades consistentes aunque transitorias. Así, el hecho de que en el mundo prevalezca la necesidad, para Demócrito

significaba, en líneas más generales, que el proceso físico como un todo ocurre necesariamente dada la naturaleza de los átomos (tamaño, figura, “ajuste” mutuo) en su relación con el vacío. En otras palabras, se trata de una necesidad que, en el sistema físico (de los átomos y el vacío), es interna. Así, por ejemplo el remolino o vórtice produce colisiones y uniones mecánicas, teóricamente determinables entre los átomos pero estas secuencias no obedecen a un plan².

Es decir, que las colisiones entre los átomos no están predeterminadas por una mente omnicomprendensiva sino que son el producto de la acción causal mecánica. Es sobresaliente el hecho de que en el pensamiento de Demócrito, el movimiento se concibe como una condición fundamental de las partículas de la materia. Y para que tal movimiento se haga posible, se hace fundamental la existencia de un

² CARLEDGE, Paul: Demócrito. Santa Fe de Bogotá: Grupo Editorial Norma, 1999. p. 35.

medio a través del cual éste pueda realizarse: el vacío, el cual no se concibe como la nada absoluta, sino como parte de la existencia, como el espacio necesario para que puedan presentarse los distintos movimientos de las partículas de la materia. Así, el vacío se hace fundamental para que sucedan las interacciones entre los átomos y para que puedan conformarse las diversas formas compuestas. Aún más, el vacío constituye una condición necesaria para que los cuerpos posean determinadas propiedades como la maleabilidad, el grado de solidez, la fluidez, etc. Sin la existencia del vacío sería imposible, por ejemplo, introducir nuestras manos o cualquier objeto en el agua, ya que los átomos que conforman el líquido, al ser compactos e impenetrables, crearían una barrera imposible de traspasar, mientras que gracias a cierto complejo entretejido determinado en el que alternan átomos y vacío, se hace posible la propiedad de que el agua sea traspasada por un cuerpo lo suficientemente macizo para lograrlo. Las diferentes proporciones entre átomos y vacío que conforman un cuerpo compuesto, determinan sus cualidades, haciendo que configuraciones estructuradas, en virtud de diferentes proporciones de átomos y vacío, den como resultado cuerpos diferentes con propiedades específicas y diferenciables entre sí.

Demócrito sostuvo en sus rasgos esenciales la perspectiva filosófica de su maestro Leucipo y agregó aspectos que enriquecieron la teoría atómica de la Antigüedad. Este sistema consiste en un mecanismo de partículas en el que, como ya se ha dicho, todo lo que existe son átomos en movimiento, concibiéndose el universo como el conjunto de las interacciones entre esos átomos a través del vacío para conformar cuerpos finitos que se disocian cuando su ciclo temporal ha terminado y que vuelven a hacer parte del ciclo universal del movimiento de la materia hasta el infinito. Se dice que este sistema atómico es mecanicista puesto que los cuerpos interactúan de manera inevitable como efecto del movimiento fundamental de las partículas integrantes del todo. En el universo atomista de Demócrito todo sucede necesariamente y como producto inevitable de una concatenación causal que envuelve a todo lo existente. Nada proviene de la nada,

puesto que todo tiene su explicación suficiente en la colisión de los átomos y en las diferentes formas en que éstos pueden organizarse.

De hecho, para Demócrito, incluso el pensamiento y las percepciones son el resultado de complejas conformaciones atómicas que interactúan con los cuerpos igualmente atómicos del mundo perceptible. “La mente del hombre estaría formada por átomos esféricos livianos, suaves, refinados y el cuerpo, por átomos más pesados. Las percepciones sensibles, tales como la audición o la visión, son explicables por la interacción entre los átomos de los efluvios que parten de la cosa percibida y los átomos del receptor”³. La conciencia sería, pues, para Demócrito, una forma especial de organización de la materia, capaz de interactuar con los demás cuerpos materiales para generar en sí una representación de lo que la cosa es. El pensamiento y la sensación serían productos de la interacción entre un complejo de átomos como el ser humano, y otros complejos de átomos como los árboles o cualquier objeto del medio que busca conocerse. Demócrito “enseñó que la percepción -la razón por la cual pienso, por ejemplo, que tengo una pluma en la mano- era un proceso puramente físico y mecanicista; que el pensamiento y la sensación eran atributos de la materia reunida de un modo suficientemente fino y complejo, y no de algún espíritu infundido por los dioses en la materia”⁴. De esta manera, para Demócrito, el ser humano puede conocer las cosas a través de la experiencia, pero imperfecta y superficialmente; sólo a través de la razón es posible dilucidar que detrás de los fenómenos aparentes lo único que se esconde son las diferentes maneras de movimiento de los átomos. David Bohm señala que:

“En este punto de vista, todas las variadas propiedades cualitativas que aparecen a gran escala, tales como la solidez, fluidez, color, textura, etc., son consideradas como categorías puramente subjetivas, ya que no aparecen en las leyes básicas

³ NOVACK, George. Los orígenes del materialismo. Bogotá: Editorial Pluma, 1977. p. 115.

⁴ SAGAN. Op. cit., p. 180.

gobernando los movimientos de los átomos, sino que son pensadas como nada más que conceptos mediadores que encontramos convenientes de utilizar en nuestro pensamiento sobre las distribuciones y movimientos de las moléculas en masa. Las propiedades fundamentales que son objetivas y no el resultado de nuestras formas especiales de pensar sobre las cosas, son asumidas como las propiedades básicas cuantitativamente especificables de los átomos—sus posiciones, velocidades, tamaños, formas, masas y las leyes de fuerza entre ellas”⁵.

Todo cuanto se explica mediante la sensación es pura opinión, pura apariencia, el verdadero conocimiento se expresa en función de átomos y vacío, ya que son éstos la última realidad que subyace a todo.

Vemos aquí un acentuado determinismo en el cual la interacción mecánica entre las partes constitutivas de los complejos de átomos produce los diversos efectos. La forma en cómo percibimos el mundo con sus cualidades diversas es sólo ilusorio, lo que en realidad existen son átomos en movimiento que interactúan para producir las diferentes formas de existencia de la materia. Se trata, pues, de una visión puramente mecanicista del mundo en la que sólo hay partículas y la interacción mecánica entre las mismas por medio del espacio vacío. Es un determinismo rígido que consiste en una mecánica de partículas materiales en la que cada cambio se explica en términos de los efectos causados por el choque de tales partículas.

El atomismo mecanicista de Leucipo y Demócrito resulta ser la consolidación de la visión determinista del mundo en la Antigüedad y representa, a su vez, el culmen

⁵ BOHM, David. *Causality and chance in modern physics*. London: Routledge, 1957. p. 26: “In this point of view, then, all the various qualitative properties that appear at the large scale, such as hardness, fluidity, colour, texture, etc., are regarded as purely subjective categories, since they do not appear in the basic laws governing the motions of the atoms, but are thought of as nothing more than intermediary concepts that we find it convenient to utilize in our thinking about the arrangements and motions of molecules en masse. The fundamental properties that are objective and not the result of our special ways of thinking about things, are assumed to be the basic quantitatively specifiable properties of the atoms—their positions, velocities, sizes, shapes, masses, the laws of force between them”.

hacia el cual convergieron todos los esfuerzos de la filosofía naturalista antigua en su búsqueda de una explicación al orden de la naturaleza a través de una comprensión de los principios físicos que la rigen. No en vano se dice que Demócrito fue el último filósofo naturalista de la Antigüedad, puesto que con su formulación del atomismo se alcanza el punto más álgido de la investigación filosófica que había partido desde Tales y, a partir de entonces, surgen condiciones políticas y culturales que impulsaron un viraje en el objeto de la investigación filosófica griega. Demócrito, como representante más sobresaliente de la escuela atomista de la Antigua Grecia, fundamentó la teoría determinista más completa sobre la materia que podría concebirse en ese entonces. Sin embargo, el valor histórico de su obra fue disminuido notablemente desde Platón hasta finales de la Edad Media.

A excepción de Epicuro (S. IV y III a. de C.), Lucrecio (S. I a. de C.), y los pocos pensadores interesados por la ciencia antigua, nadie volvió a hablar del atomismo de Demócrito hasta el Renacimiento. Sólo hasta 1545, en el nuevo ambiente cultural de Europa, vuelve a mencionarse a Demócrito en la obra *De sympathia et antipathia* escrita por un médico humanista llamado Girolamo Francastoro. Esta obra constituye un vínculo indispensable entre la filosofía natural antigua y la ciencia natural experimental que comenzaba a cobrar fuerza en el marco del Humanismo, el Renacimiento y la Revolución Científica. La figura de Demócrito fue muy valorada en el Renacimiento, constituyéndose en un fuerte impulso para el desarrollo de la cosmovisión mecanicista que se desarrollaría junto con la ciencia moderna. A Demócrito se le apodaba “el filósofo que ríe” porque prefería no tomarse tan en serio el rechazo pueril de sus congéneres a las ideas que constituían su convicción lógica, para él el mundo es una comedia representada por personas que, presumiendo saberes superficiales, menosprecian el valor de ideas no convencionales y se privan de aproximarse un poco más a la verdad. Michel de Montaigne, humanista francés del Renacimiento, le dedicó a Demócrito

y Heráclito uno de sus *Ensayos*; un síntoma del aprecio profesado hacia esos filósofos por los intelectuales del Renacimiento.

Hoy, al repasar la historia que nos lleva hasta los modernos descubrimientos del siglo XX con respecto al átomo, su estructura y los principios que rigen su comportamiento, nos encontramos con una teoría muy diferente de la que Demócrito llegó a imaginar; los átomos no son los últimos constituyentes de toda la materia (aunque sí los constituyentes fundamentales de los elementos químicos) y, además, el movimiento de la materia a escala subatómica es infinitamente más complejo que los remolinos y trayectorias rectilíneas que Demócrito imaginó propias de los átomos. Demócrito no contó con un aparato científico ni tecnológico que le permitiera experimentar la realidad microscópica de las cosas, pero contó con una intuición aguda y una lógica sólida. En todo caso, aunque entre la teoría atómica de Demócrito y la moderna teoría cuántica existen diferencias técnicas y científicas tremendas, podemos decir que el legado de Demócrito prevaleció, y aunque se descubrió que los átomos sí son divisibles, la idea de que la materia posee una estructura atómica constituye uno de los fundamentos de la física moderna. Así, aunque se intentó subestimar y desaparecer el atomismo de Demócrito, al final, como no podía ser de otra manera y haciendo honor a su sobrenombre, es este filósofo quien ríe.

1.1.3. *Epicuro, Lucrecio y el desarrollo del atomismo antiguo*

Como se ha dicho, la teoría atómica de la antigüedad representa el límite epistemológico hacia el cual convergen los esfuerzos de la filosofía presocrática por encontrar un principio material constitutivo de todas las cosas y que, debido a ciertos cambios introducidos en la sociedad de su época, las ideas que constituían el cuerpo de su teoría atomista, fueron generalmente ignoradas y rechazadas después de su muerte, y aún desde sus años de vida por su contemporáneo Platón. Sin embargo, hubo algunas excepciones. Epicuro de Samos (341-270 a. de C.) proporcionó un nuevo impulso a la teoría atomista en la

Antigüedad. La obra de Epicuro fue popularizada en el tiempo a través del romano Tito Lucrecio Caro que vivió entre los años 99 y 55 a. de C. y escribió un extenso poema, *De rerum natura*, traducido como *Sobre la naturaleza de las cosas*, en el que se exponen todos los rasgos de la filosofía epicureísta, de la cual, el atomismo constituye una parte fundamental. *Sobre la naturaleza de las cosas* es un puente que se extiende desde la antigüedad hasta el Renacimiento, en medio del abismo oscuro del medioevo, en donde la figura del atomismo brilla por su sombra. También se logró transmitir la *Epístola a Heródoto*, que es una parte de los documentos de Epicuro que se lograron preservar, éndose en una pieza clave en la que se encuentran consignados sus principios generales de la teoría atómica.

En la *Epístola a Heródoto*⁶, los principios del atomismo aparecen formulados claramente y es posible identificar en sus rasgos esenciales los postulados que ya Demócrito había planteado. En primer lugar, nos dice que “nada llega a ser a partir de lo no existente”. Es decir, que no podemos considerar el nacimiento o la descomposición de un cuerpo como el advenimiento de algo a partir de la nada o como la aniquilación total de su existencia, lo único que existe es la unión y la separación de los átomos de un cuerpo compuesto. Agrega Epicuro que “el todo es cuerpos y vacío”, como si prevaleciera un reduccionismo del mundo a materia moviéndose en el espacio. Sin embargo, y a pesar de las discrepancias de Aristóteles⁷, el todo no es en el atomismo, ni de Demócrito ni de Epicuro, un todo continuo, sino una realidad “granulada”, de partículas independientes aunque articuladas, a través de distintas mediaciones con el todo. De los cuerpos conformados por esta realidad granulada, nos dice que “los unos son compuestos, y los otros aquellos (elementos) de los cuales se componen los compuestos”. O

⁶ Todos los Fragmentos citados directamente desde: EPICURO. *Epístola a Heródoto*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, , 2008. p. 148

⁷ Aristóteles rechazaba la idea de vacío y esgrimió críticas contra los atomistas a causa de que aceptaron esta noción para justificar el movimiento de los átomos a través del espacio. Para Aristóteles, el mundo constituye una totalidad continua absolutamente llena de materia en la cual el espacio aparentemente vacío está en realidad contenido de una materia sutil que denominó éter o quintaesencia.

sea que los cuerpos compuestos poseen una existencia transitoria que, una vez transcurrida, encuentra la desintegración en sus partes componentes, las cuales ya no consisten en compuestos sino en elementos esenciales e indestructibles de la materia. También exige Epicuro que “el todo es infinito”, en el sentido de que el universo se manifiesta en una multiplicidad de mundos que coexisten simultáneamente y otros que se suceden infinitamente en el tiempo. Por otra parte, hace notar Epicuro que “los elementos indivisibles y compactos (los átomos) de los cuerpos, de los que surgen los compuestos y en los que se disuelven, son incalculables en las variedades de sus formas”. Con lo cual se presenta una infinita variedad cualitativa en cuanto a la forma de los átomos y por eso todos ellos pueden agruparse en una infinitud de configuraciones de acuerdo a las proporciones entre sus elementos. Como Demócrito ya había sugerido, para Epicuro también “los átomos se mueven continuamente, durante toda la eternidad”. Como ya se había resaltado antes en la visión atomista antigua en general, el movimiento es una propiedad inherente de los átomos. Tal movimiento de los átomos tiende a suscitarse por su propio peso y en línea recta, debido a “la naturaleza del vacío que los envuelve (...) puesto que no es capaz de ofrecer resistencia”.

Resulta muy importante resaltar que aunque Epicuro reprodujo casi todos los puntos medulares de la filosofía natural de Demócrito no se limitó a conservarlos y a reproducirlos sino que marcó cierta diferencia. Sugirió ciertas modificaciones no sustanciales pero sí significativas con respecto al mecanicismo característico de la imagen del mundo de la primera atomística. Recordemos que según Demócrito los átomos son partículas eternas e indivisibles que sólo se distinguen entre sí por su forma, orden y su posición. Nada se dice de diferencias en el peso, de modo que se asume que todos poseen el mismo. Ahora bien, sí cada átomo se mueve en línea recta en el vacío, nunca llegará a encontrarse con otro pues caerá con la misma velocidad debido al peso idéntico de todos los demás, y debido también a que no existe una fuerza de resistencia en el vacío que se oponga. De esta

manera, las colisiones entre los átomos se hacen imposibles, así como se hace imposible que se dé origen a formas más complejas de movimiento que conlleven a la conformación de cuerpos como el vórtice o torbellino de Demócrito que llevó a la creación de la Tierra y otros compuestos.

Después de este razonamiento, Epicuro necesitaba un principio para explicar la colisión entre los átomos, y por lo tanto, el fundamento de que surjan conformaciones de cuerpos complejos. Las colisiones no podían ser simplemente en línea recta, y sólo luego en otras formas derivadas. Los átomos tenían que moverse de otros modos. Así, Epicuro explicó primero que los átomos se mueven de manera natural, debido a la caída que su propio peso genera y a la falta de resistencia en el vacío. Luego admitió que los átomos tenían que chocarse para formar vórtices y formas de movimiento complejo que lleven a originar compuestos atómicos, pero negó que esto pudiese suceder si se partiera del movimiento rectilíneo. Para que las colisiones entre los átomos fueran posibles, debía existir una especie de movimiento espontáneo en ellos que les hiciera desviarse de su trayectoria recta regular, chocando con otros átomos para formar modos de movimiento más complejos y diferentes posibilidades para que éstos se combinen en diferentes cuerpos. Epicuro utilizó el término *parénklisis* para referirse a esa desviación en la trayectoria recta normal de los átomos que le ayudó a explicar las colisiones. Lucrecio tradujo ésta palabra al latín como *Clinamen*.

Lo que podemos saber acerca de este aspecto de la teoría atomista de Epicuro se lo debemos sobre todo a Lucrecio. En este pasaje extraído de *De rerum natura* está cristalizada la idea de Parénklisis o clinamen:

Deseo también que sepas, a este propósito, que cuando los átomos caen en línea recta a través del vacío en virtud de su propio peso, en un momento indeterminado y en indeterminado lugar se desvían un poco, lo suficiente para poder decir que su movimiento ha variado. Que si no declinaran los principios, caerían todos hacia

*abajo cual gotas de lluvia, por el abismo del vacío, y no se producirían entre ellos ni choques ni golpes; así la Naturaleza nunca hubiera creado nada...Así, nunca podrán los más graves caer sobre los más ligeros, ni engendrar por su cuenta golpes que causen los variados movimientos que la Naturaleza necesita para su actividad. Por lo cual, una vez más lo repito, es preciso que los átomos declinen un poco; sólo el mínimo posible, no se diga que imaginamos movimientos oblicuos, que la realidad refutaría. Pues una cosa vemos clara y manifiesta: los pesos, de suyo, no pueden caer oblicuamente cuando se precipitan desde arriba, en cuanto podemos observar. Pero, que nada se desvíe en absoluto de la vertical, ¿quién hay que pueda observarlo?*⁸

A través de la parénklisis atómica, Epicuro introduce un elemento de contingencia al interior de la mecánica atómica para explicar los movimientos que dan origen a las interacciones entre los átomos. Epicuro no niega el carácter necesario de las relaciones causales en que ésta se manifiesta el movimiento del mundo, pero agrega que, para que las formas estables como los planetas, las estrellas, los elementos de un paisaje, los animales o los humanos puedan existir, debe ser inherente al movimiento de la materia cierta ruptura en su transcurso regular. La parénklisis de Epicuro resulta esencial para explicar la manera cómo desde formas elementales como los átomos surgen formas compuestas y complejas. Los átomos no pueden partir de su movimiento totalmente en línea recta, porque de esta manera no colisionarían para dar lugar a conformaciones determinadas. Dice Benjamín Farrington a este respecto: “Esta caída continuaría por siempre, sin contacto entre los átomos, si no fuera porque están dotados del poder de desviarse ligeramente en cualquier punto del espacio o del tiempo. Por causa de esta desviación, los átomos se ponen en contacto. Al chocar entre ellos, se origina una vorágine que en su día dio lugar al mundo”⁹.

⁸ LUCRECIO Caro, Tito. De rerum Natura. Barcelona: Bosch-Casa Editorial, 1976. p. 175.

⁹ FARRINGTON, Benjamin. La rebelión de Epicuro. Barcelona: Ediciones de Cultura Popular, 1968. p.155.

Así, con la Parénklisis, Epicuro postula otra clase de movimiento atómico para explicar los procesos mediante los cuales los átomos llegan a interactuar y conformar determinadas disposiciones. Tal vez, en el atomismo de Demócrito no se encontraba resuelta la cuestión de cómo los átomos, inicialmente en línea recta, comienzan a interactuar entre sí, y fue una de las razones por las cuales Aristóteles le criticó y elaboró su postulado del motor inmóvil para solucionar el problema del primer impulso que puso a andar al universo. Epicuro recurre a su noción de parénklisis para solucionar de una manera más satisfactoria el problema de cómo los átomos en movimiento recto devienen en formas compuestas y a su vez para contraponerse a la tesis aristotélica de la causa primera (que Aristóteles identificaba con la divinidad); la parénklisis es un esfuerzo por complementar la necesidad propia del universo con la contingencia; a través de tal concepto se trata de explicar cómo, por medio de irregularidades relativas en el comportamiento de los componentes elementales de la materia, se originan nuevas cadenas causales que dan origen a nuevas posibles formas de existencia.

Pero no hay que dejar de lado que la declinación en el curso normalmente recto de los átomos sucede en el marco general de la necesidad. Es imprescindible señalar que, en rasgos generales, la atomística epicúrea no se sale de la imagen mecanicista del universo que ya se veía en la atomística democrítea; sin embargo, al plantear el carácter complementario de la casualidad, Epicuro evita un abordaje unilateral y abarca más aspectos de la realidad para proporcionar una imagen más satisfactoria del mundo en términos de materia y movimiento. Agustín Fernando Lavoz resume esto, afirmando:

Por lo tanto, en el sistema epicúreo la contingencia sólo adquiere sentido a partir de una matriz universal inalterable de átomos y vacío. Siguiendo esto, a pesar del posible cambio de trayectoria de un átomo que se desvía de su línea recta original, y aunque esto signifique una contingencia del futuro, la trayectoria adyacente a la cual se ha desviado representa un curso ya existente en una matriz universal necesaria.

En otras palabras, lo que ocurra en el futuro de ese átomo que se ha desviado hacia otra trayectoria no es algo nuevo sino distinto de lo que habría sido si hubiere seguido la misma trayectoria: y me refiero con distinto a que su trayectoria tras desviarse es parte de la matriz universal necesaria y, según esto mismo, también una trayectoria es necesaria en su existencia: en efecto, la trayectoria hacia la cual se ha desviado un átomo no es generada a partir de esa desviación, sino que es parte del universo en su totalidad¹⁰.

En el cuadro general del universo atomista de Epicuro, la casualidad, contingencias expresadas en el movimiento desviatorio de los átomos, son un elemento fundamental de la naturaleza del mundo y de todas las cosas. Epicuro consideraba que el mundo totalmente mecanicista y regido puramente por la necesidad natural, causaría un universo incambiable y determinado fatalmente hacia fines predeterminados. Dicha imagen del mundo es insostenible y es una simplificación que no da razón real de cómo suceden las cosas. La naturaleza del universo es determinista, pero en ella cumple un papel fundamental la casualidad sin la cual sería inexplicable la vasta diversidad de singularidades existentes.

Resulta interesante observar cómo ya en la Antigüedad se plantearon inquietudes frente a una visión determinista del mundo basada en un rígido mecanicismo y cómo se trató de resolver lo que implicaría reducir todo a la necesidad. Recordaremos esto cuando nos sumerjamos en el mundo de las partículas atómicas del siglo XX: la teoría de los cuantos desafiará también la visión mecanicista de la física clásica a la que en seguida nos aproximaremos. Con estos apuntes se cierra nuestro acercamiento a la noción de determinismo en la Antigüedad. Las geniales intuiciones y razonamientos de la escuela atomista representan un ejemplo destacado de ese determinismo germinal e incipiente. Estas ideas, como todas las ideas que forja e ser humano, florecieron en medio de

¹⁰ LAVOZ Torres, Agustín Fernando. La teoría de la parénklisis atómica y su rol en la ontología de Epicuro: Una reconstrucción y una interpretación . Santiago de Chile: Universidad Alberto Hurtado, 2012. P. 17.

unas condiciones históricas y, dado el punto en el que se encontraba la ciencia y la técnica de la Antigüedad, en realidad los atomistas llegaron más lejos de lo que en esas condiciones se podría esperar, y de hecho así lo hicieron con respecto a otros pueblos contemporáneos suyos. Como se dijo antes, el legado atomista se mantuvo largo tiempo marginado, pero, como veremos, en el Renacimiento se redescubre y se convierte en un catalizador del desarrollo de la ciencia que comienza a emerger desde entonces.

Capítulo 2

Consolidación del determinismo en la física clásica

1. 2.1. El resurgir del legado griego y su influencia en la visión científica clásica

Los antiguos griegos formularon geniales acercamientos a la idea de un universo ordenado. Pero aunque ya existían teorías mecanicistas como la de los atomistas, y aunque por otro lado estaban ya cobrando fuerza los experimentos y el desarrollo de las matemáticas, no hubo en la Antigüedad un método científico coherentemente organizado. Es decir, no tuvieron una herramienta sistemática para conocer la naturaleza que se fundamentara en un enlace entre experimentación y abstracción matemática; un método que permitiera describir con precisión cuantitativa los sucesos de la naturaleza. Por eso, los griegos antiguos no llegaron a formular leyes como sí se haría más adelante. El concepto de ley se encontraba en un estado rudimentario, aunque ya se venía advirtiendo la regularidad subyacente en la naturaleza y la necesidad de expresarla en principios racionales. No obstante, hay que señalar que de haberse continuado por esos senderos se hubiera llegado muy probablemente a los desarrollos que sólo después de varios siglos se pudieron alcanzar. David Bohm dice que “En los tiempos antiguos sólo existía una vaga noción cualitativa del orden en la naturaleza. Con el desarrollo de las matemáticas, en especial de la aritmética y la geometría, surgió la posibilidad de definir formas y relaciones con más precisión, de tal modo que, por ejemplo, se pudieran describir con detalle las órbitas de los planetas, etc.”¹¹. Esta forma de expresar las relaciones cuantitativas subyacentes a la realidad natural sólo se vendría a consolidar después de la Revolución

¹¹ BOHM, David. La totalidad y el orden implicado. Barcelona: Editorial Kairos, 1980. p. 162.

Científica de los siglos XVI y XVII, cuando se superaron los obstáculos que impedían el florecimiento de la ciencia.

Además, las investigaciones adelantadas por los griegos de la Antigüedad fueron parcialmente eclipsadas con el advenimiento de la Edad Media en Europa. Aparte de algunos desarrollos en el ámbito de la lógica formal, traducciones y valiosos comentarios sobre los filósofos griegos, algunos elementos fueron adaptados a la cosmovisión fundamentalmente religiosa de la época para dar “justificación teórica” a los dogmas sostenidos. La cosmología geocéntrica de Aristóteles, luego retocada por Ptolomeo, fue asimilada por el pensamiento religioso, pues se encontraba en consonancia con el presupuesto de que la Tierra ocupaba un lugar central y privilegiado para la atención del ojo de Dios. Tal visión aristotélico-ptolemaica consistía en un universo estructurado con base en una jerarquía de esferas, una dentro de la otra, y que van de lo sublunar, corruptible y terrenal a lo supralunar, eterno y divino. En tal sistema, la Tierra en el centro del universo y perteneciente al mundo sublunar, se encuentra inmóvil, pero alrededor de ella giran las múltiples esferas etéreas en la última de las cuales se encuentran incrustados los múltiples astros del cosmos. El movimiento de cada esfera es causado por el movimiento de la que le sucede, y la última, la de las estrellas fijas, es movida por el motor inmóvil, identificado con la divinidad.

Durante el Renacimiento, periodo comprendido entre los siglos XV y XVI d. de C., se comienzan a venir abajo los dogmas de la Iglesia y se posibilita nuevamente el pensamiento crítico y racional. Se crean unas nuevas condiciones para el resurgimiento de la ciencia y se vuelve la vista en retrospectiva hacia la Grecia Antigua para retomar el camino que los pensadores de dicho periodo habían comenzado ya a transitar. Se presta un especial interés a las teorías planteadas al margen de la autoridad intelectual de Aristóteles, como la filosofía natural y el pitagorismo, y se investiga esto con base en la tradición matemática establecida en la antigüedad, pues por encima de la mentalidad renacentista sobrevuela la

idea de que la armonía del universo se expresa con elegancia matemática. De este modo, aunque el Renacimiento fue fundamentalmente un movimiento que buscaba una renovación en las artes y las letras, se preparan también en este periodo los factores detonantes para la Revolución Científica que habría de sucederse en el par de siglos siguientes, constituyendo un vehículo directo entre los forjadores de la ciencia en la Antigua Grecia y los forjadores de la ciencia moderna.

Así, por ejemplo, Nicolás Copérnico (1473-1543) retomó el pensamiento de Aristarco de Samos, quien en el siglo III a. de C. había ya planteado una cosmología heliocéntrica, para hacer patentes las fisuras en el modelo aristotélico-ptolemaico que había imperado como un dogma por siglos y siglos y planteando un modelo mucho más satisfactorio en consonancia con las observaciones. Asimismo, la física y las matemáticas que Arquímedes había desarrollado también en el siglo III a. de C. constituyeron un caldo de cultivo importante para muchas de las ideas científicas que empezaron a surgir; los estudios en mecánica que Arquímedes había adelantado y sus experimentos con palancas y poleas resultaron imprescindibles para que, por ejemplo, Galileo Galilei (1564-1642) comenzara a investigar la mecánica de los procesos naturales con base en la observación de situaciones físicas recreadas conscientemente. También la geometría de Euclides, axiomatizada en sus *Elementos*, obra ampliamente comentada por los árabes, comienza a divulgarse gracias a la invención de la imprenta; la popularidad de Euclides se extiende a la vez que proporciona a los humanistas del Renacimiento las herramientas matemáticas para el estudio del espacio. En múltiples aspectos, la cultura griega de la Antigüedad se extiende a lo largo de la Europa del Renacimiento, generando repercusiones decisivas para la historia del pensamiento humano. Dice Nicolás Abbagnano:

Estos elementos son integrados por la nueva ciencia con la reducción de la naturaleza a pura objetividad mensurable: a un complejo de cosas o formas

constituidas esencialmente por determinaciones cuantitativas y sujetas, por tanto, a leyes matemáticas...La experiencia y el cálculo revelan la naturaleza en su objetividad: esto es, en la *simplicidad* y en la *necesidad* de sus operaciones...En estas palabras se reconoce claramente la esencia última de la objetividad de la naturaleza: aquella necesidad que determina el orden mensurable de la misma y se expresa por la relación causal entre los fenómenos¹².

A esto hay que agregarle el hecho de que la filosofía mecanicista desarrollada por los atomistas griegos resurgió, como se había señalado, a través de *De Rerum Natura*. Se dice que alrededor de comienzos del siglo XVII, el poema de Lucrecio extendía su popularidad y con ello la visión mecanicista y determinista del atomismo antiguo. La expansión del poema de Lucrecio y la influencia del atomismo antiguo traerían aparejadas repercusiones relevantes para la consolidación de la cosmovisión determinista en la ciencia moderna que vendría a desarrollarse. Pierre Gassendi (1592-1655) fue un filósofo, astrónomo y sacerdote que miró en la filosofía atomista de Epicuro una forma muy coherente para explicar los fenómenos físicos. Acude a la idea de que el cosmos está constituido de una infinita multiplicidad de partículas indivisibles y critica el postulado aristotélico de que el mundo constituye un todo continuo en donde el aparente vacío se encuentra lleno del sutil éter. Gassendi acogió la tesis de que todo en el mundo se reduce a átomos y vacío, aunque rechazó así el principio epicúreo de la parénklisis o clinamen, reemplazando la desviación primaria de los átomos por una inteligencia divina causante de la estructuración de los átomos en cuerpos complejos. También se hace explícita la visión atomista de este científico en su forma de concebir los procesos de la conciencia, compartiendo con los antiguos atomistas, por ejemplo, el planteamiento de que las propiedades secundarias de las cosas se podían explicar en términos de sus propiedades fundamentales. Así, los sabores se explican en virtud de las propiedades de sus átomos constitutivos: el sabor ácido es una sensación subjetiva de una propiedad objetiva de la materia

¹² ABBAGNANO, Nicolás. Historia de la filosofía, tomo II: Filosofía moderna-filosofía postkantiana. Barcelona: Montaner y Simon, S.A., 1955. p. 133.

compuesta, en este caso, por átomos puntiagudos. Esta visión mecanicista y atomista de los procesos naturales encontró opiniones divididas entre los forjadores de la tradición científica moderna. Entre los contemporáneos de Gassendi, Descartes se opuso a la teoría atomista a pesar de que profesaba un acentuado mecanicismo en su visión del Universo. Galileo intercambió correspondencia con Gassendi y, al parecer, en los inicios de su investigación científica se acercó a los planteamientos mecanicistas del atomismo, para luego encaminarse hacia un enfoque más matemático y cuantitativo de la realidad inspirado en las enseñanzas de los pitagóricos y neoplatónicos que habían emergido con nueva fuerza en el Renacimiento.

1,2.2. Descartes, Spinoza y el surgimiento de la filosofía mecanicista.

En medio de la atmósfera cultural europea de la Revolución Científica de los siglos XVI y XVII, la idea de un mundo racionalmente ordenado se hacía cada vez más generalizada entre los investigadores de la naturaleza. Se comenzaron a extender las ideas mecanicistas y se planteó la necesidad de recurrir al arbitrio del experimento y a la cuantificación matemática de los resultados obtenidos de tal experimentación. Galileo, junto con sus desarrollos en la mecánica, su estudio de la inercia, y su visión prevalentemente empirista, postulaba la necesidad de formalizar matemáticamente los resultados de la observación de esos procesos mecánicos estudiados, acabando con siglos de rendirle cuentas a los argumentos de autoridad, y también yendo más allá de la tradición científica de la antigüedad en la que había prevalecido un carácter cualitativo en la investigación. Galileo afirmaba que el libro de la naturaleza está escrito en lenguaje matemático; luego, por medio de una rigurosa observación y abstracción racional, aparecía la posibilidad de que la mente descubriera una sintaxis matemática del mundo, aprendiendo a “leer” fluidamente ese gran libro de la naturaleza. Comenzó a recobrar fuerza la confianza en el potencial cognoscitivo del ser humano para estudiar la naturaleza; la posibilidad de que el ser humano descifre la estructura

matemática del cosmos se convirtió en una realidad gracias a la aplicación sistemática de un método investigativo que articula coherentemente la experimentación y la abstracción matemática de los resultados. Todas las figuras que participaron en la formación del nuevo espíritu científico pusieron en cuestión la relevancia del orden antiguo y postularon una nueva perspectiva sobre el orden universal basada en la física matemática.

Uno de los filósofos más importantes que vislumbró el mecanicismo que rige al interior de los procesos de la naturaleza fue el ya mencionado René Descartes (1596-1650). Fue un gran matemático y naturalista; aunque atacó la cosmología aristotélica y acogió el modelo copernicano, compartió con el estagirita la idea de que el universo consiste en un todo continuo que excluye la existencia del vacío. También rechazó el atomismo que su contemporáneo Gassendi había acogido del poema de Lucrecio, aunque aceptó una visión mecanicista en la que todo cambio producido en el universo puede explicarse en virtud de choques rectilíneos entre cuerpos; era sobre todo la idea de vacío la que resultaba inaceptable para este filósofo. Debía existir un medio continuo a través del cual se mueven los cuerpos en el universo. Descartes¹³ postuló que todo lo material es extenso, y que lo extenso encierra propiedades geométricas, de modo que todo el universo es descriptible por las propiedades matemáticas y las relaciones cuantitativas entre las partes integrantes.

Así como Galileo, Descartes compartía el principio de que el libro de la naturaleza estaba escrito en lenguaje matemático, y profundizaba ésta premisa concibiendo la analogía de un universo como un inmenso y complejo mecanismo de relojería que se expresa en términos de los movimientos causados por la interacción entre unas y otras partes constitutivas. Las transformaciones experimentadas en un fenómeno físico son reducibles a materia y movimiento; sus transformaciones

¹³ Un profundo análisis sobre el mecanicismo de Descartes se encuentra en GORTARI, Elí de. Ensayos filosóficos sobre la ciencia moderna. México, D.F.: Grijalbo, 1984. p. 23.

poseen una estructura mecánica perfectamente cuantificable y expresable por medio de las matemáticas. La ciencia del Universo, para él, deberá tratarse sólo en términos de extensión y de movimiento, siguiendo los principios de la mecánica que Galileo se encontraba investigando y de la geometría plana elaborada desde el siglo IV a. de C. por Euclides.

Ya en Descartes se encuentra formulada la inercia, cuando dice que todo en el mundo permanece en el estado en que se encuentra en tanto no es perturbado por algo que lo cambie. También, anticipando a Newton, consideraba que todos los cuerpos que se mueven conservan su movimiento en línea recta. Pero, aunque estos rasgos del pensamiento cartesiano describen ya su inclinación por una concepción determinista del universo, el núcleo de la visión mecanicista y determinista de Descartes se encuentra en la idea de que la cantidad de movimiento siempre se conserva, no sólo en los sucesos particulares sino en todo el Universo. Los cambios en los estados de las cosas que son reducibles a movimiento nunca surgen de la nada, no se crean, no se destruyen, sólo se transforman, y resultan ser un intercambio mecánico entre las partes existentes¹⁴. Para Descartes, Dios otorgó el movimiento primigenio a la compleja máquina del mundo, pero una vez transferido ese movimiento, todos los cambios y todos los movimientos particulares se presentan en forma de interacción directa entre las partes. La materia únicamente puede afectar a la materia al ser afectada de manera local por ella, no existe lugar en este cuadro general del mundo para cambios cualitativos ni cuantitativos de la materia por fuera de la interacción mecánica directa. “Descartes creía que todo cambio en el universo corpuscular provenía de una sucesión de movimientos libres interrumpidos a intervalos por colisiones entre corpúsculos...reconoció que en la naturaleza todas las partículas

¹⁴ En este sentido, hay que agregar que aunque Descartes anticipó algunas de las ideas que posteriormente servirían para el planteamiento de la síntesis mecánica de Newton, éste último va a diferir del primero al aceptar la posibilidad de acciones instantáneas a distancia, un rasgo no-local incompatible con el reduccionismo cartesiano de las interacciones físicas a contacto directo entre cuerpos, es decir, a una interacción mecánica estrictamente local.

o agregados de partículas cambian constantemente su velocidad y dirección. Estas alteraciones, dice Descartes, deben tener su origen en los impulsos o tensiones ejercidas sobre ellas por otros cuerpos”¹⁵. Se fortalece así un mecanicismo que concibe al universo y a sus manifestaciones particulares, incluidos los procesos biológicos, como mecanismos articulados a un “macro-mecanismo” universal, cuyos procesos están regidos por leyes de movimiento cuantificables en virtud de la estructura matemática que subyace tras su íntima naturaleza.

De acuerdo con esto, en la imagen del universo del pensamiento cartesiano, la causalidad es una relación necesaria y objetiva que existe en todo el universo. El intercambio mecánico de movimiento se origina en todas las interacciones y constituyen el proceso universal del movimiento de la materia. En palabras más simples: la causalidad se puede reducir a un principio mecánico local o directo; todo cambio implica movimiento y todo movimiento se debe al contacto entre cuerpos. “Es cosa manifiesta, en virtud de la luz natural, que debe haber por lo menos tanta realidad en la causa eficiente y total como en su efecto: pues ¿de dónde puede sacar el efecto su realidad, si no es de la causa? ¿Y cómo podría esa causa comunicársela, si no la tuviera ella misma?”¹⁶. Todo lo que sucede en el universo es el resultado de la acción de una causa que se extiende encadenándose en el tiempo, de modo que para que algo se produzca debe haber un cambio previo y un movimiento que posibilite su surgimiento. En cualquier caso, la relación causal implica una relación de necesidad objetiva. Nada en el mundo está dado contingentemente, todos los cambios que experimenta la materia están determinados por las leyes mecánicas del movimiento, con lo cual la naturaleza se expresa de una manera necesariamente determinista y se encuentra constituida racionalmente, de tal manera que se excluye cualquier indicio de arbitrariedad o irregularidad.

¹⁵ KUHN, Thomas S.. La revolución copernicana. Barcelona: Ediciones Orbis S.A., 1987. p. 308.

¹⁶ DESCARTES, René. Meditaciones metafísicas con objeciones y respuestas. Madrid: Ediciones Alfaguara, 1977. p 36.

Más adelante, Baruch Spinoza (1632-1677) concibió el movimiento y el reposo como propiedades esenciales de la materia. Para Spinoza el cambio es reducible a movimiento; puede ser concebido como producto de las interacciones entre los cuerpos y se mantiene constante en la totalidad de interacciones particulares. Pero, a diferencia de Descartes, el movimiento total, como propiedad constante de la materia, no proviene de un impulso primario infundido por el Creador sino del carácter dinámico inherente a la naturaleza que se despliega continuamente hacia múltiples determinaciones transitorias, sin que ésta en su totalidad deje de ser infinita y eterna. Todas las modificaciones que se dan entre los cuerpos particulares de la naturaleza se expresan como la interacción entre las partes de una única sustancia.

La visión determinista del mundo de Spinoza se expresa de manera clara en la universalidad que atribuye al principio de causalidad; dice este filósofo que de una determinada causa dada se sigue necesariamente un efecto y que si no se da causa alguna determinada, es imposible que un efecto se siga. Se establece así un estricto mecanicismo y consecuentemente una visión determinista de la realidad objetiva. En su concepción, el conocimiento del efecto depende del conocimiento de la causa, y lo implica. Spinoza expresa en su filosofía la tendencia de su época a concebir el Universo como un todo ordenado y determinado por leyes causales y mecánicas que rigen su desenvolvimiento. Sus acercamientos al estudio del mundo como una totalidad causal elevan cada suceso y existencia a la categoría de necesidad, haciendo que los fenómenos casuales desaparezcan. “Un cuerpo en movimiento o en reposo ha debido ser determinado al movimiento o al reposo por otro cuerpo, el cual ha sido también determinado al movimiento o al reposo por otro, y éste a su vez por otro, y así hasta el infinito”¹⁷. Cada suceso particular, sin embargo, no es un efecto inmediato

¹⁷ SPINOZA, Baruch de. *Ética demostrada según el orden geométrico*. Madrid: Ediciones Orbis S.A., 1980. p.31.

de las afecciones en los atributos de la substancia, sino que está mediado por un entroncamiento infinito de causas y efectos que unen a lo particular con lo universal.

Las diversas configuraciones de la naturaleza encierran una compleja determinación sistemática particular al interior del gran sistema universal. Cada configuración de la naturaleza cualitativamente específica es la expresión de una configuración cuantitativa igual de específica. Es interesante lo que comenta Stuart Hampshire:

Aquellos cambios de cualidad en los cuerpos compuestos grandes, a los que nos referimos en el lenguaje corriente, debe concebirse como cambios en la velocidad y cohesión de las partículas elementales. Los cambios cualitativos en los objetos de tamaño medio, como se los describe según el conocimiento del sentido común, sólo son representables a la luz del conocimiento sistemático como cambios mensurables en la velocidad y configuración de partículas cualitativamente indiferenciadas¹⁸.

Toda cosa en el Universo es una afección en los atributos de la naturaleza, esto es, toda configuración cualitativa es la expresión de una modificación cuantitativa de las propiedades esenciales de la naturaleza, realidad última de todo. Cada existencia particular puede comprenderse como una variación resultante de la interacción que constituye la compleja trama del proceso universal. Hay pues, un acercamiento muy profundo por parte de Spinoza a la noción de interconexión mutua entre todos los procesos del universo. Su visión es más refinada que la de Descartes, porque cada uno de los procesos del Universo se encuentra causalmente determinado y hace parte de un entretejido de leyes que rigen su desarrollo.

¹⁸ HAMPSHIRE, Stuart. Spinoza. Madrid: Alianza Editorial, 1982. p. 53.

Spinoza consideraba un mecanicismo complejo en el que la casualidad resulta ser sólo aparente; en última instancia no existe ninguna modificación en los atributos de la naturaleza que se encuentre desligada de una causa que la produce. Para Spinoza, el desconocimiento de una causa no puede ser concebido como la inexistencia de la misma en cualquier fenómeno, ni puede ser atribuido a fuerzas sobrenaturales o impulsos azarosos absolutamente espontáneos; así, para Spinoza la casualidad resulta ser el resultado del desconocimiento de las causas de algo que aparece como inexplicable pero que tiene sus causas subyacentes. Así se expresa Spinoza ante quienes adjudican a designios sobrenaturales, al azar o a la ausencia misma de causas, lo que es en realidad un síntoma del desconocimiento de la manera en cómo procede la naturaleza:

Pues si, por ejemplo, cayese una piedra desde lo alto sobre la cabeza de alguien, y lo matase, demostrarán que la piedra ha caído para matar a ese hombre de la manera siguiente. Si no ha caído con dicho fin, queriéndolo Dios, ¿cómo han podido juntarse al azar tantas circunstancias? (y, efectivamente, a menudo concurren muchas a la a vez). Acaso responderéis que ello ha sucedido porque el viento soplabo y el hombre pasaba por allí. Pero-insistirán- ¿Por qué soplabo entonces el viento? ¿Por qué el hombre pasaba por allí entonces? Si respondéis, de nuevo, que el viento se levantó porque el mar, estando el tiempo aún tranquilo, había empezado a agitarse el día anterior, y que el hombre había sido invitado por un amigo, insistirán de nuevo, a su vez –ya que el preguntar no tiene fin-: ¿y por qué se agitaba el mar? ¿Por qué el hombre fue invitado en aquel momento? Y, de tal suerte, no cesarán de preguntar las causas de las causas, hasta que os refugiéis en la voluntad de Dios, ese asilo de la ignorancia. Así, también, cuando contemplan la fábrica del cuerpo humano, quedan estupefactos, y concluyen, puesto que ignoran las causas de algo tan bien hecho, que es obra no mecánica, sino divina o sobrenatural, y constituida de modo tal que ninguna parte perjudica a otra. Y de aquí proviene que quien investiga las verdaderas causas de los milagros, y procura, tocante a las cosas naturales, entenderlas como sabio, y no admirarlas como necio, sea considerado hereje e impío, proclamando tal por aquellos a quien el vulgo adora como intérpretes de la naturaleza y de los dioses. Porque ellos saben que,

suprimida la ignorancia, se suprime la estúpida admiración, esto es, se les quita el único medio que tienen de argumentar y de preservar su autoridad¹⁹.

Por lo tanto, de acuerdo con Spinoza, no hay por qué apresurarnos a adjudicar un carácter casual, contingente o azaroso a aquello que se nos aparece como tal; detrás de ello todo se encuentra determinado por cadenas de interacciones de causas y efectos que dan razón de lo que sucede y de lo que cada cosa es. El mecanicismo de Spinoza excluye así la contingencia y atribuye una determinación causal que se extiende a todo lo existente. Es esto, en gran parte, el reflejo de los estudios mecánicos que se venían adelantando, y a su vez, retroalimentaba la visión mecanicista que implícitamente se asumía en todas las investigaciones científicas de la época.

1.2.3. Newton, la mecánica clásica y la fundamentación científica del determinismo.

Tuvo que llegar la segunda mitad del siglo XVII para que Isaac Newton (1642-1727), después de asimilar la experiencia científica de sus predecesores, lograra consolidar la mecánica clásica, sintetizando siglos de investigación y otorgando a los científicos un marco sólido sobre el cual proseguir investigaciones ulteriores. Newton proporcionó una nueva forma de concebir el orden de la naturaleza y la intrepidez de su razonamiento alcanza unas dimensiones tan profundas que aún en nuestros días suscita gran admiración. Brian Silver dice que “La obra de Newton sobre el movimiento de los cuerpos constituyó un hito en la historia del intelecto humano, no sólo de la ciencia. Tanto él como Galileo se percataron de la naturaleza de la conexión entre el movimiento y la fuerza, conexión que validó el concepto de un universo ordenado, un cosmos inteligible para la razón humana”²⁰. Sobre la base de la mecánica clásica desarrollada por Newton se vendría a

¹⁹ SPINOZA. Op. Cit., p. 94.

²⁰ SILVER, Brian L.. El ascenso de la ciencia. México D.F.: Fondo de Cultura Económica, 2005. P. 71.

constituir una rígida visión determinista del mundo abalada por la ciencia experimental; la creciente eficacia predictiva del formalismo desarrollado por Newton confirmaba la capacidad humana para escudriñar y descifrar el orden de la naturaleza.

Newton investigó amplios dominios de la naturaleza y se propuso la tarea de crear una ciencia basada en leyes universales que dieran base a la noción de orden implicada en la cosmovisión determinista. Newton conservó el heliocentrismo de Copérnico y la inercia rectilínea que había postulado Descartes en sus estudios mecánicos; retomó los estudios galileanos sobre el comportamiento de los cuerpos en caída libre para investigar la razón por la cual los cuerpos son atraídos hacia la tierra; tomó las tres leyes del movimiento planetario de Kepler para investigar la naturaleza del movimiento de los cuerpos celestes. Desarrolló a partir de esto un conjunto de postulados capaces de abarcar todos los fenómenos estudiados anteriormente. Newton desarrolló el cálculo infinitesimal al mismo tiempo que Leibniz y fue el primero en aplicarlo al estudio de la realidad física. Así, basándose en los logros de la matemática antigua, ingenió los mecanismos para que esta se encontrara a la altura de los fenómenos estudiados por la mecánica de su tiempo. Gracias al cálculo infinitesimal (compuesto por el cálculo diferencial y el cálculo integral) fue posible el cálculo de derivadas, o lo que en términos físicos sería el cálculo de la variación en las propiedades de un sistema físico estudiado, como la aceleración de un cuerpo en función de su masa y la fuerza aplicada. A través del cálculo se logró estudiar el movimiento en el mundo físico cuantificando los valores de las propiedades que determinan el estado de un sistema y fijando la variación experimentada en los valores de esas propiedades en virtud de las fuerzas aplicadas.

La obra de Newton que sintetiza todos sus progresos se llama *Philosophiæ naturalis principia mathematica* o *Principios matemáticos de la filosofía natural*; fue

publicada en 1687. En ella se formulan las tres leyes del movimiento mecánico que según Newton son extensivas a cualquier proceso físico en el universo:

- 1) Todos los cuerpos perseveran en su estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta, salvo que se vean forzados a cambiar ese estado por fuerzas impresas;
- 2) El cambio de movimiento es proporcional a la fuerza motriz impresa, y se hace en la dirección de la línea recta en la que se imprime esa fuerza;
- 3) Para toda acción hay siempre una reacción opuesta e igual. Las acciones recíprocas de dos cuerpos entre sí son siempre iguales y dirigidas hacia partes contrarias²¹.

La primera ley debe mucho a Descartes, Galileo y Gassendi y se le denomina comúnmente como ley de *inercia*; postula la resistencia general de cualquier cuerpo a cambiar su estado de movimiento, de modo que un cuerpo en movimiento rectilíneo persiste en tal estado a menos que actúe sobre él algo que le haga cambiar como la fricción, la interacción con otro cuerpo o la interacción con cualquier tipo de fuerza externa. Ésta ley postula que, en ausencia de una fuerza, el estado de un sistema físico en movimiento no cambia, pero no proporciona ninguna información acerca de lo que sucede con un sistema físico cuando actúa sobre él una fuerza; para dar razón las variaciones en las propiedades fundamentales de los sistemas físicos, se postula la segunda ley

La segunda ley nos explica matemáticamente, los cambios que experimenta el estado de movimiento de los cuerpos a causa de la acción de una determinada fuerza.” Siempre que un cuerpo que se mueve en línea recta *cambie* de velocidad o dirección, en él se opera la segunda ley. Siempre que un cuerpo en reposo *comienza* a moverse, necesitamos de esta ley para predecir su comportamiento. Siempre que sobre un *cuerpo en movimiento* actúe una fuerza, la segunda ley nos

²¹ NEWTON, Isaac. Principios matemáticos de la filosofía natural. Madrid: Tecnos S.A., 1987. p. 42.

dice cómo cambia ese movimiento de manera cuantitativa”²². La segunda ley, resulta ser un elemento nuclear de toda la física clásica puesto que explica matemáticamente la dinámica de todos los cuerpos macroscópicos, tanto de los objetos al interior de la Tierra, como de aquellos que se mueven en el espacio exterior. La segunda ley se expresa mediante el formalismo $\mathbf{a} = \mathbf{F}/m$ o, lo que es equivalente, $\mathbf{F} = m \times \mathbf{a}$; en ella se encuentran conceptualizados algunos de los componentes básicos del universo: masa, fuerza y movimiento. Así, la aceleración o el cambio en la velocidad de un cuerpo, está directamente relacionado con la acción de una fuerza, puesto que si actúa una fuerza neta sobre un cuerpo, cambiará la aceleración del mismo. De esta manera, si conocemos la fuerza que actúa sobre un cuerpo, sólo necesitaremos conocer la masa del mismo para calcular la variación en su movimiento en un tiempo dado. En este orden de ideas, la primera ley resulta ser tan sólo un caso especial de la segunda puesto que postula que un cuerpo no cambia su estado de movimiento a menos que una fuerza actúe sobre él, y tal postulado está dado precisamente por la segunda ley cuando $\mathbf{F} = \mathbf{0}$ y, si $\mathbf{F} = \mathbf{0}$, entonces el producto por la velocidad será también 0, lo cual significa que el estado de movimiento del cuerpo no se altera, sea que se encuentre inmóvil o en movimiento rectilíneo uniforme.

La tercera ley nos habla de que siempre que dos cuerpos interactúan se produce una acción y una reacción, que resultan ser iguales y opuestas. Con esto, Newton nos da a entender que las fuerzas deben concebirse como la acción recíproca entre dos cuerpos y no simplemente como una fuerza transferida de un cuerpo a otro. La ley de acción-reacción presupone que por cada fuerza ejercida sobre un cuerpo, éste produce una fuerza de igual cantidad, pero de sentido contrario sobre el cuerpo que la produjo.

Como podemos ver, la noción de fuerza se encuentra presente en las tres leyes y constituye la condición necesaria para los cambios mecánicos en los sistemas

²² SILVER. Op. cit., p, 82.

físicos que integran la naturaleza. La noción de fuerza ocupa un lugar central en la física clásica porque cumple la función de representar cuantitativamente cómo se producen las interacciones entre los diferentes componentes y sistemas del universo, y por lo tanto constituye la causa de los cambios experimentados en la dinámica de los cuerpos macroscópicos. El Universo se reduce en este caso a cuerpos que interactúan a través de fuerzas en un escenario quieto y absoluto compuesto por el tiempo y el espacio como entidades independientes. El eminente historiador de la ciencia especializado en Newton, Alfred Rupert Hall, ha comentado acerca del legado de la obra de Newton que

Ninguna otra reivindicó con tanta autoridad la concepción mecanicista de la naturaleza, tan extendida e imitada en otras partes de la ciencia. Sólo existió un momento en el que la experimentación y la observación, la filosofía mecánica y los métodos matemáticos avanzados pudieron unirse para obtener un sistema de pensamiento congruente en sí mismo y a la vez verificable mediante las pruebas empíricas disponibles. Sólo hubo una oportunidad para poner orden en la física celeste, y fue Newton quien lo puso. El suyo es el mundo de la ley²³.

Después de haberse consolidado la física clásica, se prepararon las condiciones para el establecimiento de una visión determinista del mundo, cada vez más extendida hacia amplios campos de la realidad y que vendría a predominar en la ciencia por largo tiempo, al menos dos siglos. La fortaleza de las leyes del movimiento formuladas por Newton reside en la capacidad que brindan para predecir y explicar con considerable precisión el movimiento de los sistemas mecánicos macroscópicos. Newton, haciendo extensivas las leyes a todo el Universo posibilitó una visión mecanicista y determinista en el cual, las tres leyes, más la gravitación universal también postulada en *Principia*, y las condiciones particulares de un fenómeno cualquiera en el Universo, determinan de manera unívoca su proceder, de lo que se sigue que si conocemos las leyes mecánicas y

²³ RUPERT Hall, Alfred. La revolución científica. Barcelona: Editorial Crítica, 1985. p. 137.

también el estado de un sistema en movimiento con precisión, en un momento dado, es posible predecir o caracterizar su estado en cualquier momento del futuro con exactitud (incluso el pasado puede ser precisado). David Bohm resalta que:

“Las leyes del movimiento de Newton implican que el comportamiento futuro de un sistema de cuerpos está determinado completa y precisamente para todos los periodos de tiempo en términos de las posiciones iniciales y de las velocidades de todos los cuerpos en un instante de tiempo dado, y de las fuerzas que actúan sobre los cuerpos. Estas fuerzas podrían ser fuerzas externas, las cuales surgen desde fuera del sistema bajo investigación, o podrían ser fuerzas internas de interacción entre los varios cuerpos involucrados en el sistema en cuestión”²⁴.

Así, la evolución de todo sistema físico está determinada por unas pocas leyes físicas y por sus condiciones iniciales que pueden simplificarse en términos de funciones de las posiciones y velocidades de las partes involucradas, de modo que éstas fijan su pasado y su futuro y describen el orden y la sucesión de cada proceso de la realidad. Conocer simultáneamente y con precisión el estado de movimiento de un cuerpo y las coordenadas en que se encuentra resulta no sólo una posibilidad derivada de la mecánica newtoniana, sino un postulado esencial para fijar el estado actual de un sistema físico y el estado potencial hacia el cuál va a evolucionar de acuerdo a las condiciones iniciales y a las leyes del movimiento. Hay que decir que esta visión se fortaleció aún más cuando se pudo predecir con base en la mecánica newtoniana el regreso del cometa Halley en el año 1835, por ejemplo.

²⁴ BOHM, David. Causality and chance in modern physics. London: Routledge, 1957. p. 24: “Newton’s laws of motion imply that the future behaviour of a system of bodies is determined completely and precisely for all time in terms of the initial positions and velocities of all the bodies at a given instant of time, and of the forces acting on the bodies. These forces may be external forces, which arise outside the system under investigation, or they may be internal forces of interaction between the various bodies that make up the system in question”.

Newton utilizó la expresión “*Natura non facit saltus*” para instaurar el principio de que los procesos de la naturaleza siempre transcurren de una manera gradual, continua y obedeciendo indefectiblemente a las leyes de la mecánica, las cuales estipulan una causalidad rígida, sin lugar para la desviación de la regularidad en los procesos. El movimiento de los cuerpos puede ser descrito por medio de trayectorias regulares que no experimentan cambios repentinos sino sólo a causa de la acción de fuerzas determinadas. El azar, la contingencia y la casualidad no son rasgos prevalecientes en la estructura de los procesos naturales sino la necesidad, rasgo absoluto que se expresa en la sujeción a ley a la que se atienen todos los procesos físicos del universo.

Así, las leyes de Newton otorgaron al investigador de la naturaleza un potencial predictivo de un nivel nunca antes suscitado, pues permiten conocer, mientras se precisen las propiedades esenciales que fijan el estado de un sistema físico (cosa que en los sistemas macroscópicos es ampliamente posible), el comportamiento que ostentará en las fases sucesivas de su proceso de desenvolvimiento .

El éxito de la mecánica newtoniana tuvo importantes repercusiones en la imagen general del mundo y del lugar que en él le corresponde al ser humano. La confianza en el intelecto para predecir el comportamiento de la naturaleza fue incrementándose, así como se fue fortaleciendo la convicción humana de que el universo es un inmenso cosmos determinista en el que cada parte se encuentra articulada al todo sin lugar para el azar, y en donde materia terrestre y celeste se rigen por las mismas leyes. Nunca antes la visión determinista había contado con un aval científico tan sólido. Newton proporcionó esa posibilidad. A través de su síntesis mecánica consolidó la base científica para una nueva visión de orden en el universo, y con ello abrió el campo para una vasta multiplicidad de investigaciones en los distintos dominios de la física.

1.2.4. La consolidación de un determinismo rígido.

La mecánica de Newton generó grandes repercusiones para la configuración de un cuadro general del mundo, que desde este momento se consideraba atravesado de manera absoluta por el determinismo. La universalidad otorgada a las leyes parecía hacer definitiva la hipótesis reduccionista de que la totalidad del mundo se expresa en términos de la interacción de fuerzas entre cuerpos a través del espacio y el tiempo. El principio de causalidad se considera como un fundamento insoslayable en todos los procesos y el azar, la contingencia o la casualidad resultan aparentes: en el fondo todo tiene una causa específica que explica lo ocurrido. Voltaire decía, por ejemplo, que “sería muy peculiar que toda la naturaleza y todas las estrellas obedecieran leyes eternas y que hubiera un animal de metro y medio de altura que, pese a tales leyes, pudiera siempre actuar como mejor conviniera a su capricho. Actuaría conforme al azar, y sabemos que no existe nada azaroso. Hemos inventado esta palabra para expresar el efecto conocido de una causa desconocida”²⁵. A través de opiniones como esta, influidas por el entusiasmo provocado por el éxito de la física newtoniana, se puede entrever cómo este determinismo recién postulado reproduce a grandes rasgos el determinismo implícito en el atomismo griego antiguo que Gassendi había desenterrado, pero ahora se nutre del carácter cuantitativo expresado en leyes matemáticas.

Entre los representantes del ala más radical de la Ilustración estaban los materialistas franceses que defendieron un agudo determinismo mecanicista, resaltaron un profundo reduccionismo de todos los cambios experimentados por la naturaleza a elementos simples, expresables en términos de movimiento e interacciones entre los cuerpos constitutivos del mundo material. Filósofos como Lamettrie, Holbach o Helvetius concibieron entre otras cosas que todo cuanto existe puede ser explicado en términos de causas materiales, sin necesidad de

²⁵ Citado por ABBAGNANO. Op. cit., p. 309, de VOLTAIRE. El filósofo ignorante, 1766. p. 13.

recurrir a un motor inmóvil, ya que la materia contiene en sí todas las formas, al menos en potencia. Holbach enfatiza esto diciendo:

Nada puede suceder casualmente en la naturaleza; todo discurre con sujeción a determinadas leyes...Un átomo material no se encuentra por casualidad con otro átomo, sino que este encuentro se realiza necesariamente con arreglo a leyes inmutables, bajo la acción de las cuales cada cuerpo se ve obligado a obrar como obra, sin que pueda hacerlo de otra manera, en las condiciones dadas. Hablar de una combinación casual de átomos o atribuirles algunos efectos casuales, equivale a ignorar las leyes²⁶.

No hay espacio para ninguna fuerza externa al mundo que lo ponga a funcionar, todo es producto de las interacciones mecánicas entre las partes materiales que constituyen el único mecanismo universal. Holbach, al igual que Helvetius y Lamettrie, consideran que la necesidad es el rasgo esencial de la naturaleza y, como Spinoza ya lo había demostrado, constituye la existencia aún desconocida de causas subyacentes.

Siguiendo esta tradición, pero un poco después, a comienzos del siglo XIX, también en Francia, Pierre Simón de Laplace formuló la forma más conocida de determinismo que se elevó al estatus de supuesto filosófico, fijando un presupuesto que habría de durar a lo largo de los siglos XVIII y XIX en la investigación científica de los fenómenos físicos, y de otros campos de la realidad. Laplace imaginó una mente hipotética capaz de conocer todos los estados de todas las partículas existentes en el universo, sus posiciones, sus velocidades, y las interacciones entre ellas, por medio de las leyes mecánicas que la física clásica nos proporciona, sería posible para esta mente conocer todos los detalles determinantes del futuro y el pasado del universo, sin temor a equivocaciones a causa de eventos imprevistos en los procesos. Dice Laplace:

²⁶ HOLBACH, Paul Henry. Sistema de la naturaleza. Moscú: Editorial Progreso, 1940. p. 131.

*Podemos mirar el estado presente del universo como el efecto del pasado y la causa de su futuro. Se podría concebir un intelecto que en cualquier momento dado conociera todas las fuerzas que animan la naturaleza y las posiciones de los seres que la componen; si este intelecto fuera lo suficientemente vasto como para someter los datos a análisis, podría condensar en una simple fórmula el movimiento de los grandes cuerpos del universo y del átomo más ligero; para tal intelecto nada podría ser incierto y el futuro, así como el pasado, estarían frente a sus ojos*²⁷.

Así, cuando se obtienen con precisión las condiciones en que se encuentra un proceso físico en un instante cualquiera y, además, se conocen las leyes que gobiernan su comportamiento, es posible prever rigurosamente el estado en que ese mismo proceso se encontrará en cualquier otro instante futuro, o el estado en que se encontraba en cualquier instante pasado. Elí de Gortari dice:

...el resultado de esa conjugación entre las condiciones contingentes, pero definidas, y las condiciones necesarias que se encuentran expresadas en las leyes- las cuales no definen ningún caso específico en particular-, tiene un carácter de indudable necesidad, tal como se acusa en la formulación misma del principio físico del determinismo. De este modo, la evolución de cada proceso físico se encuentra gobernada por leyes rigurosas que, combinadas con las condiciones iniciales concretas, determinan inequívocamente todos los estados pasados y futuros del proceso. Y así desde un punto de vista teórico, la historia del proceso queda enteramente determinada por las leyes naturales y por las condiciones particulares en que se encuentra en un instante cualquiera de su desenvolvimiento²⁸

Resaltemos que el carácter ineluctable, del despliegue causal de los procesos, implica una nueva exclusión de la contingencia y la casualidad del cuadro general del mundo.

²⁷ LAPLACE, Pierre Simón de. Ensayo filosófico sobre las probabilidades. Barcelona: Ediciones Altaya, 1995. p. 25.

²⁸ GORTARI, Elí de. Dialéctica de la física. México D.F.: Universidad Autónoma de México, Dirección General de Publicaciones, 1964. p. 197.

Siguiendo la premisa Newtoniana “*Natura non facit saltus*”, en el *determinismo laplaceano*, la causalidad se manifiesta siempre de manera biunívocamente determinada: las mismas causas producen siempre los mismos efectos y viceversa, los mismos efectos son producidos siempre por las mismas causas; no hay lugar para la desviación en la regularidad de los procesos del mundo. Así mismo, para cada predicción existe un solo e inequívoco resultado sustentándose en la idea de que la Naturaleza actúa en el marco de la exactitud.

En el determinismo laplaceano, como en todas las formas de mecanicismo que hemos visto, la probabilidad no se puede concebir como el hecho de que una cosa pueda pasar o no, o pueda pasar de una u otra manera; la probabilidad no refleja una incertidumbre o indefinición esencial en las cosas sino que se concibe como un síntoma de las limitaciones cognoscitivas humanas; la naturaleza funciona mecánicamente aunque no siempre sea posible conocer todos los factores que inciden en la determinación del estado de un sistema físico, la falta de explicaciones no es la ausencia de causas. Por lo anterior, aquello que resulta en principio incierto o probable, puede posteriormente ser conocido con base en la disminución y eliminación de los errores experimentales presentes en el proceso de medición, con el desarrollo de nuevos métodos y técnicas, así como a través del progreso mismo del conocimiento científico.

Todos los fenómenos-dice Laplace-, incluso los que por su pequeñez parecen no depender de las grandes leyes de la naturaleza, son una consecuencia tan necesaria como las revoluciones del sol. Desconociendo los lazos que los unen al sistema entero del universo, se les hace depender de causas finales o del azar según como se produzcan o se sucedan: con regularidad o sin orden aparente; mas estas causas imaginarias han sido rechazadas una tras otra al ampliarse los límites de nuestro conocimiento y han desaparecido por completo ante la sana filosofía,

que no ve en ellas más que la expresión de la ignorancia, de la cual nosotros somos la verdadera causa²⁹.

Con esto, en el tiempo subsecuente, tal forma de determinismo se convirtió en una convicción fuertemente enraizada en la tradición científica que partió de los desarrollos de la Mecánica Clásica, permaneciendo constante, como un principio estable de toda investigación científica y visión del mundo por largo tiempo. Sin embargo, La física clásica fue ampliando su espectro de abordaje investigativo y tuvo que desarrollarse, aunque sin nunca soslayar sus presupuestos conceptuales esenciales, uno de los cuales es que todo cambio en la naturaleza está determinado por sus condiciones concretas y las leyes específicas que actúan sobre él.

1.2.5. El determinismo y los desarrollos en la física clásica

La mecánica Newtoniana marcó una nueva forma de hacer ciencia, proporcionó la posibilidad de estudiar el comportamiento de los sistemas físicos macroscópicos a través de ecuaciones diferenciales. Estableció leyes mecánicas que supuso de generalidad universal para entender la forma en cómo se producen los cambios en los procesos físicos. Otorgó la posibilidad de fijar las propiedades determinantes del estado de un sistema físico para determinar, con base en el conocimiento simultáneo de las fuerzas que actúan sobre él, el estado futuro del mismo. Así, el determinismo se presentaba como una consecuencia lógica necesaria del estado en que se encontraba la ciencia física de aquel tiempo.

Más tarde, entre 1772 y 1778, el matemático, físico y astrónomo Joseph Louis de Lagrange desarrolló la *mecánica analítica* que constituyó una reformulación y generalización de la mecánica de Newton. A través de ésta reformulación, Lagrange recopiló, completó y unificó la mecánica newtoniana, simplificando las

²⁹ LAPLACE. Op. cit., p. 85.

fórmulas matemáticas y facilitando el cálculo de valores para el estudio de los procesos físicos. La mecánica lagrangiana se denomina analítica porque introduce el postulado de que es posible derivar fórmulas generales a partir de un único principio implícito para obtener resultados particulares en el estudio de cualquier sistema físico. Lagrange planteó que la naturaleza procede de tal forma que minimice siempre el gasto de energía en el tránsito de un estado a otro al interior de cualquier proceso físico. A éste postulado se le denominó *principio de mínima acción*, y ya había sido considerado por Leibniz, D'Alembert y Pierre-Louis Moreau de Maupertuis. Este último afirmaba que la naturaleza es económica en todas sus acciones. Bajo tal postulado fue posible explicar la razón por la cual la naturaleza es descriptible según las leyes de Newton. Además, la mecánica de Lagrange permitió calcular la evolución temporal de los sistemas físicos estableciendo las coordenadas generalizadas y las velocidades generalizadas, a partir de las cuales es posible fijar, usando ecuaciones diferenciales y conociendo las fuerzas actuantes, el estado hacia el cual se desplegarán. Los desarrollos de Lagrange, enriquecieron la mecánica clásica y dieron la posibilidad de estudiar de una manera menos complicada los procesos de la realidad física a través de sistemas formales que involucran un mayor grado de abstracción. Es de resaltar que en los años 30's de principios del siglo XIX, en la misma línea de Lagrange, el matemático y físico William R. Hamilton contribuyó también al desarrollo del formalismo matemático de la mecánica clásica.

Por otra parte, a lo largo de los siglos XVIII y, sobre todo, XIX, la investigación física centró su foco de atención sobre niveles de la realidad que le llevarían a significativos desarrollos. Al menos tres acontecimientos científicos habría que mencionarse para comprender las repercusiones que tuvieron estos desarrollos sobre la concepción mecanicista y determinista del mundo: la formulación de las leyes básicas de los campos electromagnéticos; el desarrollo de la teoría cinética de los gases; y la introducción del uso de explicaciones estadísticas a las leyes de la termodinámica. Todos estos progresos, en su conjunto, agrietaron, en parte, el

presupuesto de un orden inmutable en la naturaleza que se había venido sosteniendo sobre la base de la mecánica clásica, introduciendo nociones de aleatoriedad y desorden en la naturaleza. No obstante, con el avance de nuevos métodos para el estudio, fue posible ir esclareciendo nuevamente el orden subyacente a estos fenómenos.

En primer lugar, la formulación de las leyes del electromagnetismo fue realizada por James Clerk Maxwell (1831-1879), un eminente científico que había aportado ya en el estudio del movimiento de los gases y del calor. Antes del trabajo de Maxwell los fenómenos de la electricidad y el magnetismo habían sido concebidos como entidades de naturaleza diferente, y por lo tanto se habían elaborado aproximaciones para explicar el comportamiento de ambos fenómenos independientemente. Poco a poco, y gracias a los trabajos de Michael Faraday (1791-1867) Maxwell logró consolidar la noción de campo electromagnético que unifica ambas naturalezas, electricidad y magnetismo, y logró formular las leyes que rigen el comportamiento de los campos electromagnéticos. Resulta clave mencionar aquí que con el descubrimiento de entidades físicas denominadas *campos*, y la formulación de las leyes del electromagnetismo que rigen sus procesos, se puso en evidencia la poca pertinencia del esquema newtoniano, basado en cuerpos que interactúan por medio de fuerzas y cuyo movimiento puede ser descrito en términos de posiciones y velocidades.

Un campo puede concebirse como la distribución espacial de ciertas propiedades de los sistemas físicos tales como la temperatura, la energía, la electricidad y el magnetismo. David Bohm nos ayuda a ilustrar esto considerando que “mientras que la existencia de los cuerpos requiere que estén localizados en alguna región definida del espacio, los campos son concebidos como continuamente distribuidos

a lo largo del espacio como un todo”³⁰. De esta manera los campos son formas cualitativamente diferentes de existencia de la materia de las que había tenido noticia la física newtoniana. La física de Newton podría ser concebida como una física de partículas macroscópicas, pero la noción de campo electromagnético introduce una concepción más sutil de la materia. Se trata de una distribución espacial asociada con alguna de las propiedades constitutivas del estado de un sistema físico. Así, con el desarrollo del electromagnetismo de Maxwell, “el concepto de materia efectivamente ha sido expandido para incluir la noción de campo como representación de la extensión a través de una amplia región de espacio de ciertas manifestaciones del sistema físico”³¹. La existencia de campos electromagnéticos implica la existencia de interacciones mucho más complejas en la materia que el movimiento mecánico de uno o varios cuerpos o la acción a distancia que mantiene unidos los planetas. Así “la hipótesis hecha hacia el final del siglo diecinueve de que el campo existe por derecho propio como una clase cualitativamente nueva de entidad fue un importante paso lejos del mecanicismo”³². Pero no del determinismo, pues los campos constituyen continuos sujetos a leyes que determinan su despliegue en el tiempo y en el espacio, y que ostentan por lo tanto un comportamiento regulado y sujeto a la causalidad.

Las ecuaciones de Maxwell, que describen los patrones que regulan el comportamiento de las propiedades electromagnéticas de la materia enriquecieron la física clásica contribuyendo a alumbrar la comprensión científica de la dinámica de estos sistemas físicos recientemente conocidos como campos. Las fórmulas de Maxwell determinan la manera cómo experimentan cambios los campos electromagnéticos en términos de los valores de las cantidades asociadas al

³⁰ BOHM. Op. cit., p. 28: “Whereas the mode of existence of the bodies required that they be localized in some definite region of space, the fields were conceived of as continuously distributed throughout space as a whole”.

³¹ Ibíd., p. 30: “the concept of matter has effectively been expanded to include the notion of the field as representing the extension through a broad region of space of certain manifestations of a material system”.

³² Ibíd., p. 30: “the hypothesis made towards the end of the nineteenth century that the field exists in its own right as a qualitatively new kind of entity was an important step away from mechanism”.

campo en cada instante de tiempo y en términos de los movimientos de todas las partes cargadas que se encuentran involucradas en el sistema. Maxwell teorizó, basándose en los adelantos experimentales de Thomas Young, que la luz consiste en un fenómeno especial de ondas electromagnéticas y, aplicando sus fórmulas en este estudio, proporcionó la posibilidad de explicar cómo se propagan esas *ondas* y con qué velocidad.

Pasemos ahora a la teoría cinética de los gases.

La teoría cinética ayudó describir y explicar el comportamiento de los gases y su relación con la temperatura. En esta teoría se concibe al calor como una forma de movimiento molecular y a los gases como complejos de moléculas que se mueven chocando unas con otras; el incremento en la temperatura hace que las moléculas choquen más veloz y erráticamente entre sí, así como la temperatura, sus incrementos y sus decrecimientos pueden ser descritos en función del movimiento y la velocidad con que se mueven y chocan las moléculas involucradas en el todo. Esta teoría fue fundamentada por Daniel Bernoulli en 1738, y desarrollada posteriormente por Mikhail Lomonosov (1747), Rudolf Clausius (1857), Maxwell, y luego Ludwig Boltzman quien generalizó los logros de sus predecesores.

Así, en el marco de estos estudios resurge la hipótesis de la constitución íntimamente corpuscular de la materia y de que existe una mecánica que describe los procesos dinámicos de interacción entre estas partículas. La teoría cinética de los gases concibe a estos estados de la materia como compuestos complejos de moléculas y que la temperatura, como propiedad intrínseca de tales sistemas, consiste en una manifestación de la velocidad con que esos elementos constitutivos de los gases chocan. Resulta significativo resaltar aquí que los detalles de los movimientos de las moléculas individuales resultan demasiado sensibles a cómo las otras moléculas se mueven, por lo que es demasiado complejo, y en muchos casos imposible, describir el movimiento individual de

cada partícula constitutiva del gas, planteándose la necesidad de acudir a métodos estadísticos que permitan calcular el promedio del movimiento de las moléculas que componen el gas, para poder establecer cómo se comportará el después. Así, la teoría cinética de los gases ofrece un conjunto de postulados matemáticos que permiten calcular cuantitativamente el comportamiento de sistemas que involucren un gran número de componentes interactuando entre sí, a veces, a grandes velocidades y otras veces en equilibrio. De esta manera se posibilita una mecánica de los gases, puesto que se describe el comportamiento de los mismos, y de sus propiedades, como la temperatura, en términos de la interacción de sus partículas constitutivas, en este caso moléculas. El tratamiento que se le da a estos estudios es de carácter estadístico, pues sólo es posible conocer cómo se comportará un sistema molecular teniéndolo en cuenta como un todo y estudiándolo a través del comportamiento promedio de sus partes constitutivas. Resulta demasiado complicado estudiar el movimiento de las moléculas de un determinado sistema en forma independiente.

Los sistemas físicos que estudia la teoría cinética de los gases se caracterizan porque su estado es demasiado susceptible a las condiciones iniciales, de modo que varía con demasiada rapidez debido a la interacción constante entre las partes constitutivas. De este modo, el movimiento molecular sólo puede ser descrito estadísticamente, sin embargo, en el fondo, parece que subyace el presupuesto mecanicista del atomismo antiguo que ya emanaba desde el antiguo poema de Lucrecio:

Otra razón hay todavía para fijar atención a las partículas que vemos arremolinarse en los rayos de sol: y es que sus torbellinos nos revelan que también en el fondo de la materia hay movimientos secretos e invisibles. Allí verás, en efecto, muchas partículas, agitadas por imperceptibles golpes, cambiar de dirección y retroceder rechazadas, ora acá, ora allá, en todos sentidos. Ahora bien, todo este vagar proviene de los átomos. Porque, en primer lugar, los elementos de las cosas se

mueven por sí mismos; después, los cuerpos formados por pequeñas combinaciones y aquellos cuya energía más se aproxima a la de los átomos, impulsados por los invisibles choques de éstos, se ponen en movimiento y a su vez hostigan a los que son algo mayores. Así, partiendo de los átomos, el movimiento va ascendiendo y emerge poco a poco hacia nuestros sentidos, hasta hacer mover también estos cuerpos que nos son perceptibles en el rayo de sol, a pesar de no ser manifiesto el golpe que produce la moción³³.

En última instancia, y en estrecha ligazón con lo anterior, hay que decir que otro de los desarrollos más significativos en el seno de la estructura conceptual de la física clásica provino del desarrollo de la termodinámica. Mientras la ciencia del siglo XIX fue profundizando en el conocimiento del fenómeno del calor, fue esclareciendo las formas complejas en cómo se manifiesta el movimiento de la materia en su estructura interna. El calor se concibió como un movimiento molecular caótico que puede estudiarse estadísticamente y, a través de los esfuerzos de décadas, llegaron a comprenderse los principios que rigen la dinámica del movimiento molecular que constituye la base del fenómeno del calor.

La termodinámica parte del principio de que dados dos o más objetos que interactúan constituyendo un sistema, intercambiarán calor hasta igualarse, o sea hasta alcanzar un equilibrio térmico. Dado este postulado, se siguen las tres leyes. La primera ley establece que en todo trabajo realizado por un sistema, intercambia calor con otro, esto es, la energía no se crea de la nada ni se destruye, sólo se transfiere y se transforma de un sistema a otro. La segunda ley insta la *dirección* en la cual se dan las transferencias de energía, y por lo tanto, proscribiendo en qué direcciones es imposible tal cosa, describiendo así, la irreversibilidad de los procesos de transferencia de energía. Así, entre dos cuerpos la temperatura se transferirá siempre desde el cuerpo más caliente al menos caliente, nunca se dará el caso contrario. Así, por ejemplo, cuando se abre la

³³ LUCRECIO. Op. cit., p. 167.

ventana de una habitación porque una persona llega acalorada y necesita refrescarse, no sucede que “entre aire fresco”, si no que “sale aire tibio” de la habitación y del cuerpo del sujeto. Las moléculas de un sistema que se mueven más velozmente y que expresan una temperatura más elevada, siempre transfieren movimiento a otro sistema cuyas moléculas se mueven menos velozmente y que expresan una temperatura menos elevada, nunca un sistema cuyas moléculas se mueven lentamente transfiere movimiento a otro sistema en el que se muevan rápidamente. Este segundo principio predice la espontaneidad de un proceso: la entropía. La entropía se define en termodinámica como el grado en que se dispersa o se “desordena” la energía en un sistema. Un sistema puede ser una taza de café o todo el Universo. Se dice que a mayor dispersión mayor será la entropía de un sistema. Más tarde, a principios del siglo XX, se postuló la tercera ley o tercer principio que establece la imposibilidad de que un sistema llegue al cero absoluto, con lo cual resulta también imposible que los sistemas moleculares se conciben independientemente del movimiento, pues es una propiedad que les es inherente.

Resulta significativo que el estudio de la dinámica del calor haya obligado a desarrollar métodos estadísticos que faciliten la representación de las extremadamente complicadas formas del movimiento molecular implícito en los procesos termodinámicos, los cuales poseen un alto grado de aleatoriedad pues, como habíamos visto, los movimientos de cada molécula en los procesos termodinámicos son evidentemente contingentes dado que fluctúan continuamente por la múltiple injerencia de un número de factores involucrados. Así, el desarrollo de teorías matemáticas de la probabilidad permitió calcular el despliegue de los sistemas compuestos por grandes números de moléculas y con múltiples propiedades. A través del cálculo del promedio de determinadas propiedades se vislumbró la posibilidad de predecir probabilísticamente el estado futuro de un sistema termodinámico, no obstante el complejo movimiento de la materia que comenzaba a estudiarse, pudo ir abordándose de manera determinista con base

en principios que regulan su comportamiento físico. El determinismo parecía mantenerse, aunque los sistemas termodinámicos sólo pudieran explicarse probabilísticamente, los choques entre las moléculas encierran la realidad de interacciones causales entre unas y otras partículas que se evidencian en un comportamiento macroscópico regular.

Aunque a través del estudio del comportamiento de los gases y la formulación estadística de la termodinámica comenzaron a introducirse elementos probabilísticos en la ciencia, fundamentalmente, la visión determinista se mantuvo. Ninguno de los conceptos que enriquecieron la estructura conceptual de la física clásica entra en directa contradicción con la filosofía mecanicista que se había desarrollado previamente. Es posible determinar el estado presente de un sistema físico electromagnético o termodinámico y con base en los métodos precisos conocer el despliegue del mismo, pues existe una conexión causal que determina la interconexión entre uno y otro de los estados que constituyen su proceso.

No obstante, esto no debe conllevar a eclipsar el hecho de que gracias a tales desarrollos sí se avizoraron en tal mecanicismo ciertas grietas que conllevaría a nuevos desarrollos. Se advirtió que todas las leyes causales conocidas hasta el presente, por más precisas que sean, no pueden eliminar completamente las contingencias, y esto se evidencia en el electromagnetismo y la termodinámica. No hay ningún caso en el cual la acción de las leyes causales actúe de manera *pura*, libre absolutamente de las contingencias que son introducidas por variaciones en las condiciones en que actúa una ley causal determinada. Lo inevitable de patrones estables en los procesos naturales actúa por medio de condiciones particulares, y dependiendo del caso, ostenta una estructura específica y cualitativamente única en su despliegue. Así, sin renunciar al determinismo, a partir de los desarrollos esbozados en este apartado, la ciencia tuvo que aprender a convivir junto con la casualidad y la contingencia que ahora

corregirían el rígido mecanicismo de, por ejemplo, Laplace y los materialistas franceses del siglo XVIII.

Dice Bohm: “vemos que la asunción mecanicista de que todos los niveles diversos, todos los cambios cualitativos, y todas las fluctuaciones casuales, eventualmente, serán completamente reducidas, perfecta, e incondicionalmente a efectos de algún esquema fijo y limitado de leyes puramente cuantitativas, no hace ni puede seguirse de ningún desarrollo científico específico”³⁴. Así, aunque el determinismo y la causalidad resultan principios universalmente aplicables, la introducción de un elemento de contingencia en los fenómenos, expresado en el carácter probabilístico y a veces aleatorio de los sistemas, contribuye a atenuar el mecanicismo que se había planteado anteriormente y que suponía una visión restrictiva para estudiar segmentos de la realidad como los campos electromagnéticos, o el movimiento molecular inmerso en los gases y en la dinámica del calor. En todo caso, las grietas avizoradas en el mecanicismo no implican un fallo sustancial en el determinismo, ya que subsiste la visión causal y coherentemente articulada del mundo en el que un suceso se encuentra necesariamente determinado por otros y es la causa determinante de otros más. Además, se desarrolló la mecánica estadística como método para estudiar estos fenómenos con base en los promedios que estipulan la medida de su regularidad.

Ante estos adelantos el determinismo siguió firme, puesto que las nuevas nociones agregadas al bagaje conceptual de la mecánica clásica no suponían una ruptura con los rasgos esenciales que caracterizaban a la forma establecida de hacer ciencia. Newton, los desarrollos de la mecánica y las leyes formuladas por Maxwell, y la teoría cinética del calor apuntaban, en líneas generales, hacia la misma perspectiva: las condiciones particulares iniciales de un sistema físico y las

³⁴ BOHM. Op. cit., p. 42: “we see that the mechanistic assumption that all the various levels, all qualitative changes, and all chance fluctuations will eventually be reducible completely, perfectly, and unconditionally to effects of some fixed and limited scheme of purely quantitative law, does not and cannot follow from any specific scientific developments”.

leyes que se aplican en cada caso, son los factores que proyectan con exactitud el estado futuro del sistema físico en cuestión. El estado presente de un sistema físico se encuentra determinado causalmente por un estado previo y es a su vez condición determinante de su estado futuro. En la física clásica un sistema físico sobre el cual actúan determinadas fuerzas no avizora posibilidad alguna de “elegir” el comportamiento a adoptar, puesto que para todo evento existe una causa, la cual actuando mediante las condiciones apropiadas, produce un evento que resulta, en la práctica, inevitable y previsible mediante los métodos adecuados.

El determinismo se volvió, con el tiempo, una convicción cada vez más enraizada en la tradición científica basada en la Mecánica Clásica, permaneciendo constante como un principio estable de toda investigación científica y visión del mundo por largo tiempo. Los científicos de finales del siglo XIX, detentando una ciega confianza en el modelo clásico, creían que era ya muy poco lo que quedaba por conocer. Había ciertos nubarrones como la imposibilidad para prever las variaciones en la energía de un cuerpo que se calienta y que emite radiación, sin embargo se suponía que afinando las metodologías científicas disponibles, pronto se llegaría a una respuesta tan satisfactoria como otras antes obtenidas y que aquella encajaría en el cuadro físico clásico del mundo. Un físico estadounidense, Albert Michelson, afirmó en 1899 que las leyes y los hechos de la ciencia física han sido todos descubiertos y se hallan tan firmemente anclados, que la posibilidad de verse reemplazados por otros es muy remota.

Todo el edificio del conocimiento científico que se había construido sobre la base de la Mecánica Clásica de Newton se suponía irrefutable, y el determinismo que surgía como su consecuencia necesaria, se suponía irrefutable. Aunque a través del estudio del comportamiento de los gases y la formulación estadística de la termodinámica comenzaron a introducirse elementos probabilísticos en la ciencia, fundamentalmente la visión determinista se mantuvo.

Y si la mecánica clásica resulta sorprendentemente exitosa para estudiar los procesos físicos con los que nuestros sentidos están más habituados ¿podemos tener la misma seguridad de que los sistemas ultramicroscópicos sean deterministas? Cuando nos acercamos a la realidad en sus dimensiones atómicas y subatómicas, nos sumergimos en paradojas planteadas por la naturaleza al entendimiento y necesitamos agudizar nuestra intuición para asumirlas y poder seguir introduciéndonos en ésta profunda faceta de la realidad que la mecánica cuántica llegó a mostrar.

PARTE II

EL DETERMINISMO Y LA MECÁNICA CUÁNTICA

Capítulo1

Origen y desarrollo de la mecánica cuántica: objeciones a la visión determinista del mundo

En los siguientes dos capítulos se expone un esbozo histórico de los factores más relevantes que impulsaron el desarrollo de la física cuántica hasta llegar a aquellos aspectos que ponen en cuestión el determinismo. Esta cuestión se verá acentuada cuando exponamos los temas concernientes al principio o relaciones de incertidumbre de Heisenberg, el problema de la medición en física cuántica, y el carácter probabilístico del comportamiento de los sistemas cuánticos.

Empecemos, pues, este recorrido.

2.1.1. Max Planck y Albert Einstein: del cuanto de energía al cuanto de luz.

A comienzos del siglo XX la ciencia comenzó a transitar por senderos que le conllevaron a destinos insospechados. Las investigaciones concernientes al átomo y su estructura arrojaron resultados desconcertantes e incompatibles con el marco explicativo de la Mecánica Clásica. A lo largo del primer cuarto del siglo XX se fue consolidando la Mecánica Cuántica como un formalismo matemático eficaz para la predicción y explicación de los procesos atómicos y subatómicos. A medida de que las investigaciones científicas estudiaban la materia en su nivel más ínfimo, se fueron descubriendo manifestaciones inusitadas en su comportamiento. Se detectó que el mundo atómico y subatómico no representa una simple versión reducida del mundo a gran escala que habitamos y que, por lo tanto, tampoco resultan efectivas las mismas leyes clásicas para explicar esos fenómenos; se

concluía que existía no sólo una transformación cuantitativa sino también cualitativa en el tránsito del nivel macro al nivel micro de la materia.

A lo largo de las últimas décadas del siglo XIX, Max Planck (1858-1948), un eminente físico formado en el modelo clásico, intentaba resolver el problema de cómo se producen las variaciones en la energía de un cuerpo que es calentado, qué relaciones existen entre las cantidades específicas de esas variaciones de energía y las diferentes intensidades de luz irradiada que les corresponden. Este problema, conocido como el problema de la radiación del cuerpo negro, no podía ser predicho mediante las ecuaciones y modelos que se planteaban desde la física clásica. La física clásica, en este caso las ecuaciones de Maxwell, predecían que el cambio en la energía de un cuerpo calentado y su relación con la luz irradiada se daban de un modo continuo, atravesando todas las frecuencias del espectro, de modo que si se le aplica temperatura continua hasta el infinito, la luz producida debería irradiar constantemente y de manera proporcional también hasta el infinito. Esto último no sucede en la práctica, y para resolver la inconsistencia presente entre los resultados obtenidos y los resultados predichos por las ecuaciones de Maxwell, Planck terminaría realizando la conjetura de que la energía se transmite en cantidades discretas, finitas, y discontinuas que se vendrían a conocer como *cuantos*.

Previamente se creía que un sistema físico cuya energía oscila entre ciertos valores que delimitan un rango específico, podría ostentar cualquier cantidad de energía de entre los valores contenidos entre ese rango: “Hasta diciembre de 1900, era creencia universal, que podíamos elegir cualquier valor que deseáramos, entre cero y cierto máximo físicamente determinado, como la energía de un oscilador. Se habría dicho que las energías admisibles de un oscilador formaban un *continuo*”³⁵. Así, se suponía que un automóvil cuya aceleración oscila entre 0 y 180 K/h, podría tomar los valores de 10 k/h, de 20k/h, de 60k/h, pero

³⁵ SILVER. Op. cit., p. 543.

también de valores intermedios con cifras decimales como 10,5 k/h, 30,7564356 k/h, 80,15 km/h, etc. Se podía escoger, en principio, cualquiera de todos los valores contenidos en el rango de oscilación del sistema físico. Ahora bien, según la hipótesis que Planck se vio obligado a introducir, la energía se encuentra cuantizada, las variaciones en el flujo de la misma no se dan de manera continua sino por medio de valores enteros discretos, de unidades definidas como 1, 2, 3, 4, 5, cuantos, etc. Así, si un sistema físico posee 56 cuantos de energía en total, no puede absorber o emitir medio cuanto de energía, o cualquier otro valor que no sea un número entero que le esté permitido, para quedar con 55,5 o 56,5 cuantos de energía; tal sistema físico, sólo puede aumentar o disminuir cantidades enteras de cuantos de energía: de 56 sólo podría pasar a tener 57, 58 o 70, o, a la inversa, 55, 53, 30, pero nunca valores intermedios. El incremento o la disminución cuantitativa de la energía no se presenta de una manera regular, pasando por todos los puntos intermedios de la escala de valores, sino a “saltos” entre las cantidades discretas, cuantizadas, que constituyen los valores de energía permitidos para un sistema determinado.

Planck representó la figura del científico conservador que, rigurosamente ceñido al paradigma científico en el que se formó, se resiste a la introducción de innovaciones incompatibles con el marco teórico precedente. Así, Planck se obstinó en resolver infructuosamente el problema de la radiación del cuerpo negro mediante las herramientas que la física clásica proporcionaba, hasta que, en un “acto de desesperación” sucumbió a aceptar la hipótesis conjetural de que la energía no constituye un continuo que se transmite en cantidades cualesquiera que sean, sino que se transmite, se emite y se absorbe, sólo en unidades discretas e indivisibles. Así, la forma en cómo se producen las vibraciones al interior de los átomos puede presentarse de manera más o menos violenta, pero no puede adquirir cualquier valor arbitrario de energía, puesto que la variación, aumento o disminución en la energía se presenta solamente en “paquetes” de energía, o cuantos, que constituyen grados finitos de energía. Finalmente, un

oscilador, o sea un sistema físico cuya energía puede variar entre dos límites específicos que fijan su rango de variaciones, sólo puede poseer una energía vibratoria total equivalente a un número entero de cuantos.

Con esto, Planck vino a resolver el problema de cómo se presentan las variaciones en la energía de un sistema físico, y descubrió que tales variaciones se presentan como múltiplos de una constante, que luego se conocería como constante de Planck, y que vendría a ser uno de los patrones fundamentales para el estudio de la materia atómica y subatómica: se simboliza por la letra h , y permite calcular la variación de la energía de un sistema a través de la ecuación $E=h\nu$, donde E representa la energía del cuanto, ν la frecuencia natural del oscilador y h la constante de Planck. Planck, conjeturó la idea de la cuantización de la energía pero intentó auto-refutarse para salvar la imagen clásica continua donde se creía que un sistema que oscila entre dos valores delimitantes de un rango de energía, podría elegir entre cualquiera de esos valores intermedios. Planck no logró hacer coincidir su espíritu científico conservador con los sorprendentes hechos que comenzaban a vislumbrarse, y en lugar de ello se convirtió en un “revolucionario a su pesar”. El propio Planck decía: “tendré que acostumbrarme a vivir con la teoría de los cuantos. Y creedme cuando os digo que acabará expandiéndose”³⁶, y también que “... todo el proceso fue un acto de desesperación ya que tenía que encontrarse una interpretación teórica a cualquier precio, sin importar lo elevado que pudiera ser”³⁷. Cuando Planck trató de resolver el problema de la radiación del cuerpo negro, descubrió la cuantización de la energía y, con ello, inauguró la física cuántica, uno de los pilares de la revolución científica del siglo XX. Planck advirtió las grietas en la física clásica que le impedían resolver ciertos problemas, pero no dimensionó la inmensa magnitud que sus descubrimientos tendrían sobre la ciencia del siglo XX y las revueltas conceptuales que con sus planteamientos se iniciarían y en medio de las cuales

³⁶ Citado por KUMAR, Manjit, *Quántum: Einstein, Bohr y el gran debate sobre la naturaleza de la realidad*. Barcelona: Kairós S.A., 2011. P. 56.

³⁷ *Ibíd.*, p.57.

se problematizaría el determinismo. Y así, “durante el cuarto de siglo posterior a la conjetura de Planck, se hizo claro que cuando descendemos en la escala del átomo, la naturaleza se comporta de maneras que no se explican en términos de las leyes clásicas que gobiernan el mundo de Newton y Maxwell. No se echó por tierra la física clásica: se demostró que tenía limitaciones muy profundas”³⁸.

Otro descubrimiento de relevancia indiscutible para fijar el nacimiento de la física cuántica se presentó cuando Albert Einstein (1879-1955) logró explicar el efecto fotoeléctrico en 1905. El efecto fotoeléctrico consiste en lo siguiente: cuando se arrojan rayos de luz de determinadas frecuencias contra una placa de metal, existe la posibilidad de que se desprendan chispas luminosas cuando los rayos chocan contra la placa. Pero ¿por qué la luz, al chocar con el metal produce esas chispas luminosas? Después de largas investigaciones, experimentos y conjeturas, Einstein llegó a la conclusión de que las chispas se producen porque los rayos de luz, en determinadas frecuencias, logran desprender electrones de los átomos constitutivos de la placa de metal, con lo cual se introducía el planteamiento de que la luz no se comporta como ondas sino como un rayo de proyectiles, de partículas que Einstein vendría a llamar *fonones*, unidades particulares de luz cuya energía se encuentra cuantizada.

Recordemos que el problema de decidir si la naturaleza de la luz es de carácter corpuscular u ondulatorio se remonta a los siglos XVII y XVIII, época en la que Newton debatía con Huygens a este respecto. Newton asumió la hipótesis de que los rayos de luz se componen de diminutos corpúsculos o partículas luminosas y Huygens propuso que la luz se propaga a través del espacio ostentando un comportamiento ondulatorio. Este debate se vino a subsanar, aparentemente de manera definitiva, a principios del siglo XIX cuando Thomas Young demostró a través del experimento de la doble rendija que un rayo de luz, al atravesar las dos rendijas de una pared y chocar sobre una pantalla posterior experimenta procesos

³⁸ SILVER. Op. cit., p. 550.

de difracción y refleja en la pantalla un patrón de interferencia, fenómeno que presupone una característica restrictiva de los sistemas ondulatorios. Desde este momento, y con los desarrollos de Maxwell, la consideración del carácter ondulatorio de la luz comenzó a ser ampliamente aceptada y pronto se volvió una tesis indiscutible hasta principios del siglo XX, cuando Einstein investigando el efecto fotoeléctrico, retorna la vista al problema de la naturaleza de la luz y vuelve a introducir, basándose en la cuantización de la energía de Planck, la consideración de que la luz manifiesta un comportamiento que puede ser descrito corpuscularmente.

De esta manera, haciendo extensivo el postulado de la cuantización de la energía a sus investigaciones acerca de la naturaleza de la luz, Einstein terminó planteando que ésta también se transmite en unidades discretas y que, como la energía, no constituye un continuo, en el que las variaciones pueden adoptar cualquier valor intermedio de entre un rango prefijado, sino que sólo existe y se transmite en unidades enteras, múltiplos de la constante de Planck. Con esto, Einstein resolvió el problema del efecto fotoeléctrico: un rayo de luz se comporta como un torrente de proyectiles que al ser “bombardeados” con la suficiente frecuencia contra una placa de metal logran desprender, de los átomos que integran la placa metálica, algunos electrones que son la causa de las chispas que se avizoran en el experimento. Las chispas producidas al dispararse un rayo de luz contra una placa metálica serían un resultado de la interacción entre los cuantos de luz arrojados y los electrones de los átomos de la placa metálica.

Con este descubrimiento Einstein planteó una contrapartida explicativa a la teoría ondulatoria de la luz de Young que se había vuelto indiscutible hacía un siglo. En poco tiempo, se planteará el problema de si las ondas pueden comportarse como partículas, o las partículas como ondas, o si las partículas subatómicas pueden describir un comportamiento simultáneamente corpuscular y ondulatorio, o si partículas elementales como un fotón o un electrón constituyen naturalezas

singulares que no pueden identificarse ni como ondas ni como partículas sino como entidades sui generis. En todo caso, junto a Planck, Einstein abrió la mente científica a un conjunto de reconsideraciones teóricas que provocarían una revuelta conceptual cuyo desarrollo repercutiría en la consolidación de la mecánica cuántica como un formalismo matemático para estudiar dimensiones de la realidad en las que la física clásica sufre acentuadas limitaciones. Einstein investigó además la naturaleza del movimiento browniano³⁹ fortaleciendo así la hipótesis de que el nivel más íntimo de la materia posee una estructura atómica. Esta investigación que publicó simultáneamente junto con los resultados de su explicación del efecto fotoeléctrico y su artículo sobre la relatividad especial, representaron también un importante impulso para las investigaciones que vendrían a producirse y a dar a luz a la mecánica cuántica.

2.1.2. En busca de la estructura atómica de la materia

La idea de que todos los cuerpos ostentan en su nivel más profundo una estructura atómica fue formulada germinalmente, como hemos visto, por algunos de los naturalistas que vivieron hace más de 2500 años en Grecia. Naturalmente, el desarrollo técnico de la época no permitía someter a contrastación la hipótesis de la estructura atómica de la materia, por lo que tal idea se mantuvo como una intuición que en el mejor de los casos poseía un carácter hipotético. Tal aproximación se mantuvo implícita en las formulaciones de algunos filósofos y naturalistas que se adhirieron a la visión mecanicista del mundo después del Renacimiento y hasta el siglo XIX.

Así, científicos como Gassendi resucitaron la teoría atomista a partir del texto de Lucrecio y plantearon la posibilidad de que toda la diversidad cualitativa en que se

³⁹ El movimiento browniano es un tipo de movimiento aleatorio que se ha observado en algunas partículas microscópicas que se desplazan en un medio fluido sin una causa aparente, como granos de polen en una gota de agua. Fue observado por el biólogo Robert Brown en 1827; en honor a dicho científico se le conoce a tal fenómeno como movimiento browniano.

presenta la existencia de la materia se puede explicar en virtud de la multiplicidad de formas, disposiciones y estructuras en que se pueden agrupar los átomos. Esta hipótesis llegó a influir a Newton quién, en última instancia, consideró al universo como un sistema de interacciones entre partículas (cuerpos) que actúan mecánicamente produciendo cambios que se explican a través de las leyes que él mismo estipuló, y a la materia, por ejemplo la luz, como un agregado de corpúsculos que funcionan mecánicamente. Quienes estudiaron la naturaleza de los gases y del calor, como Ludwig Boltzmann, también abanderaron de manera abierta o implícita la hipótesis de la estructura atómica de la materia, pero en todos los casos no pasó de ser tan sólo eso, una hipótesis muchas veces rechazada por especulativa que sólo más tarde demostraría ser fructífera.

A comienzos del siglo XX, con los descubrimientos de Max Planck y Albert Einstein, la hipótesis de la estructura atómica de la materia va dejando de ser tan sólo una hipótesis razonable para pasar a ser una realidad indiscutible. El hecho de que la energía se constituya por unidades discretas de energía denominadas cuantos y el hecho de que un haz de luz pueda concebirse como un proyectil de corpúsculos de luz capaces de arrancar electrones, alimentaron la búsqueda de los fundamentos empíricos y teóricos que den razón de esa estructura atómica de la materia. Tuvieron que pasar muchísimos siglos de progreso científico para que la hipótesis atomista de los griegos encuentre un sustrato científico, empírico y matemático en el cual basarse. Aun así, la formulación de la teoría atómica moderna no se dio de una vez por todas sino a lo largo de sucesivos planteamientos que fueron proporcionando una imagen más aproximada de cómo es la estructura del átomo.

Entre las versiones más rudimentarias del átomo moderno, John Dalton (1766-1844) planteó en 1803 que el átomo es la unidad estructural de la materia y que corresponde a la fracción más diminuta que se puede extraer de un elemento químico siendo de esta manera indivisible. Por su parte, en 1897 Joseph John

Thompson (1856-1940) descubrió la existencia del electrón, con lo cual se venía abajo la hipótesis del carácter indivisible del átomo y se planteaba la necesidad de dilucidar una estructura atómica más compleja que incorporara el reciente descubrimiento. En consonancia con esto, Thompson imaginó que el átomo constituye una especie de “pastel” en el cual los recién descubiertos electrones con carga negativa se encuentran incrustados en una masa de carga positiva que constituye el resto del átomo. Más tarde, Ernest Rutherford (1871-1937), conservando la idea de Thompson de que el átomo posee una parte cargada positivamente y otra negativamente, planteó un nuevo progreso: el átomo posee un núcleo cargado positivamente y compuesto por protones y neutrones alrededor del cual orbitan los electrones cargados negativamente. Este modelo se asemeja a un diminuto sistema planetario y es el esquema más conocido para representar al átomo aunque no el más adecuado. Tal modelo resultó inconsistente pues los electrones, siguiendo las ecuaciones de Maxwell, deberían emitir ondas electromagnéticas perdiendo energía progresivamente hasta finalmente decaer al núcleo atómico y provocar la destrucción del átomo, algo que no sucede en la realidad.

Una nueva aproximación a la estructura del átomo fue dada por Niels Bohr (1885-1962). Este científico clave para toda la historia de la física cuántica tomó como base el átomo de hidrógeno y concibió un modelo similar al de Rutherford: El electrón sigue trayectorias estables alrededor del núcleo pero sin emitir ondas y sin perder energía como predecían las ecuaciones de Maxwell. Bohr plantea la novedad de que al interior del átomo los electrones se mueven en virtud de un número entero de paquetes de energía, es decir que existen restricciones con respecto a la energía que puede poseer un electrón, sólo se le permiten ciertas energías discretas; la energía al interior del átomo y entre los átomos se encuentra cuantizada, esto es, se absorbe y se emite sólo en ciertas unidades enteras, múltiplos de la constante de Planck. Además, según Bohr ésta cuantización de la energía se extiende a las trayectorias permitidas que puede transitar el electrón

alrededor del átomo. El electrón no puede elegir arbitrariamente cualquier trayectoria. Existen diferentes opciones con respecto a las trayectorias que el electrón puede seguir pero corresponden a un número limitado de trayectorias asociadas a cada uno de los valores discretos de energía que puede poseer el electrón. De esta manera, un electrón no puede elegir una trayectoria distinta de la que le corresponde en directa relación con el valor de energía poseído.

Sin embargo, al ser este un modelo que parte inductivamente del átomo de hidrógeno que es el átomo más simple, resultó complicado extrapolarlo al estudio de otros átomos. El modelo de Bohr resultó inadecuado para aproximarse a un estudio más general de la estructura atómica de la materia pero el hecho de haber introducido la cuantización de la energía al interior del átomo representó un paso adelante puesto que abrió la posibilidad de explicar y predecir cuantitativamente las propiedades subyacentes a la estructura más profunda de la materia y ayudó a explicar la estabilidad general del átomo. Además, estos progresos impulsaron el desarrollo de la espectroscopía que a su vez repercutió en nuevos desarrollos para estudiar la estructura y el comportamiento del átomo. Más tarde Bohr Descubrió que los electrones que orbitan alrededor del núcleo pueden “saltar” de un nivel a otro cuando absorben o emiten energía cuantizada. Así, cuando un electrón pierde un cuanto de energía emite un fotón y salta directamente a una de las órbitas de menor energía de entre las que tiene asignada o, en el caso contrario, puede absorber un cuanto de energía para “saltar” directamente a uno de los niveles de mayor energía de entre los que le son asignados a ese átomo. Es de observarse que la discontinuidad planteada por Bohr con respecto a los saltos que experimentan los electrones al absorber o emitir energía; estos saltos cuánticos implican que un electrón salta entre distintos puntos sin pasar por puntos intermedios, lo cual supone una ruptura con las trayectorias que describen los cuerpos que estudia la física clásica donde *natura non facit saltus*. Un electrón puede estar en una órbita A y aparecer en una órbita C, sin pasar por una órbita B, dependiendo de la cantidad de energía que emita u absorba, además, un electrón

nunca puede encontrarse orbitando en un punto intermedio entre A y B, sólo se le permiten ciertas trayectorias asociadas a ciertos valores de energía discretos.

Luego vendrían Schrödinger y Dirac a describir los niveles energéticos como ondas de probabilidad entre las cuales se encuentra difuminada la existencia del átomo. Éste no puede concebirse como una simple partícula sólida que sigue trayectorias bien definidas, las propiedades del movimiento de los electrones alrededor del átomo dibujan una indefinición esencial en la ubicación espacial del electrón que sólo puede expresarse como la posibilidad de encontrar al electrón en una determinada zona de probabilidad.

Aun hoy resulta complejo abordar un modelo que represente fielmente la estructura del átomo; el esclarecimiento de esta cuestión es fruto de constante investigación. Lo importante en este apartado, es reconocer que a lo largo del primer cuarto del siglo XX, se consolidó la idea de la estructura atómica de la materia y a medida que se iba profundizando en este propósito la ciencia tuvo que admitir que se trataba de un asunto mucho más complejo de lo que se pensaba y que ya no bastaban las herramientas teóricas elaboradas por la física clásica. El átomo resultó ser un sistema físico que distaba bastante de la partícula indivisible que Demócrito, Epicuro y Lucrecio imaginaron y su comportamiento resultó estar regido por leyes bastante diferentes de las estipuladas por la física clásica; en lo sucesivo habrían de desarrollarse nuevos instrumentos formales, teóricos y experimentales para investigar éste nuevo mundo tan desconcertante a los ojos de los seres humanos.

2.1.3. La dualidad onda-partícula: nuevos resultados para un viejo debate.

Traigamos a nuestra memoria de nuevo el debate entre Newton y Huygens con respecto a la naturaleza de la luz: el primero atribuyéndole un carácter corpuscular en contravía del segundo para quien dicho dilema debía explicarse en términos de

ondas. De cualquier manera, en la mecánica clásica ondas y partículas se conciben como entidades de naturaleza bien definida y diferenciada. Se trata de dos entidades físicas de características incompatibles e irreconciliables: las partículas ocupan lugares específicos en el espacio y poseen una masa definida, las ondas se caracterizan por extenderse a través del espacio con una velocidad definida pero sin masa. Así, en la física clásica los procesos de propagación de ondas nada tienen que ver con el movimiento de las partículas a través del espacio, por lo que debía definirse si la luz se explicaba en el marco de las ondas o de las partículas. Tal controversia resultó insalvable en la época de Newton y Huygens hasta que Young, a principios del siglo XIX, inclinó la balanza en favor del último y la teoría ondulatoria de la luz. Pero Einstein, a través de su explicación del efecto fotoeléctrico y gracias a los adelantos de Planck, replanteó el tema de la naturaleza de la luz, demostrando que la luz consiste en rayos discontinuos de corpúsculos de energía electromagnética. Esto no quiere decir que al final Newton haya tenido la razón con respecto a que la luz posee un carácter corpuscular; en el transcurso del primer cuarto del siglo XX se pusieron en evidencia los fallos de considerar ondas y partículas como expresiones incompatibles del movimiento la materia. ¿Puede una partícula comportarse como onda y viceversa? ¿poseen la materia y la luz un carácter corpuscular, ondulatorio, o dual?, ¿son las partículas elementales ondas, corpúsculos o entidades singulares únicas en su género que ostentan propiedades similares tanto de onda como de partícula sin limitarse a ser ni lo uno ni lo otro? En tiempos de Newton, Huygens y la física clásica tales interrogantes habrían carecido de sentido y todavía en estos días resulta complejo darles respuesta; pero en todo caso, con el advenimiento de la física de los cuantos ciertos descubrimientos mostraron que al investigar la materia en su nivel atómico y subatómico la barrera divisoria entre ondas y partículas se diluye y emerge la tesis de la dualidad ondulatorio-corpuscular.

Esto sucedió en 1924 gracias a Louis de Broglie (1892-1987) quien reconfiguró radicalmente la cuestión. Basándose en el hallazgo de Einstein de que a las ondas electromagnéticas de la luz pueden asociárseles ciertas partículas llamadas fotones, de Broglie planteó que también a todas las partículas podían asociárseles ondas específicas. Descubrió que si una partícula se encuentra en movimiento y posee un *momento*, que se calcula mediante el producto de la masa por la velocidad, entonces debía existir una longitud de onda asociada a esa partícula. Todo cuerpo en movimiento tiene una longitud de onda, la cual se calcula por medio de $\lambda = h/p$, en donde λ es la longitud de onda, h la constante de Planck y p el momento de la partícula. Con esto se echó por tierra el prejuicio clásico que planteaba una bifurcación ondas/partículas, y se planteó la naturaleza simultáneamente corpuscular y ondulatoria no sólo de la luz, sino de toda la materia.

El planteamiento de la dualidad onda-partícula resultó desconcertante, ignorado en un primer momento, pero ineludible en el transcurso de las investigaciones posteriores. Parecía inconcebible que la materia en movimiento ostentara propiedades ondulatorias o, lo que es lo mismo, que todo cuerpo posea una longitud de onda. Tal planteamiento proporcionaba una imagen borrosa y difuminada de la naturaleza de la realidad. Sin embargo múltiples experimentos realizados fortalecieron la certidumbre de la tesis planteada. Cuando se hicieron pruebas con partículas como los electrones, protones y neutrones éstos describieron el fenómeno de difracción que es propio de las ondas; en determinadas condiciones, el comportamiento de un rayo de partículas se difracta como si se tratara de una onda electromagnética cuya longitud se calcula por medio de la ecuación de de Broglie. Así, si se repite el experimento de la doble ranura de Young, pero con electrones, se obtendrá un patrón de interferencia que evidenciará el comportamiento ondulatorio de los electrones.

La ecuación de de Broglie es aplicable a todas las manifestaciones de la materia. También los cuerpos macroscópicos tienen asociada una onda correspondiente pero, debido a la gran magnitud de su masa, la longitud de onda resulta tan pequeña que en ellos se hace imposible apreciar sus características ondulatorias; sólo en los fenómenos ultramicroscópicos que poseen una masa ínfima se hace evidente el presupuesto del carácter ondulatorio de la materia.

De esta manera, la tesis de la dualidad onda-partícula, que constituye uno de los conceptos básicos de la física cuántica resulta ser también uno de los puntos de ruptura con la física clásica: al amparo del planteamiento de de Broglie se abandonó el supuesto de que las partículas constituyen entes casi puntuales que pueden ser observados en una región pequeña más o menos definida del espacio y que al mismo tiempo poseen una velocidad determinada. En lugar de ello la mecánica cuántica se representa las partículas a manera de un "campo de materia" que se propaga a través del espacio en forma similar a como lo hace una onda; así, las propiedades ondulatorias que ostentan las partículas cuánticas son un resultado de la forma en cómo se propaga el campo de materia al cual se encuentran asociadas. La dualidad onda-partícula encierra un significado radical para la física: permite advertir cierta indefinición en los estados de los sistemas cuánticos debido a la falta de localización estable de las partículas en el espacio; las partículas subatómicas no son corpúsculos consistentes y localizados establemente, su constante movimiento es causa de una difuminación esencial en el espacio que implica que su ubicación sólo pueda representarse mediante una onda de probabilidad. Esto se analizará con mayor profundidad cuando se traten las relaciones de incertidumbre de Heisenberg. Por ahora hay que cerrar este apartado recordando que de Broglie recibió el Premio Nobel de Física en 1929 por su tesis de la dualidad onda-partícula.

2.1.4. Werner Heisenberg y Erwin Schrödinger: mecánica matricial y mecánica ondulatoria, dos perspectivas matemáticas ante una sola realidad.

Paralelamente a las investigaciones que había venido adelantando Louis de Broglie, una joven generación de físicos asesorados por Max Born (1882-1970) comenzó a desarrollar el formalismo matemático que permitiría estudiar los procesos cuánticos que recientemente habían sorprendido a los científicos. Entre los físicos más sobresalientes del grupo de Born se encontraba Werner Heisenberg (1901-1976) quien a lo largo de 1925 elaboró un aparato formal muy potente para investigar los mecanismos dinámicos de los cuantos al interior de los átomos. Heisenberg elaboró un método basado en matrices que son grupos de cantidades que asignan valor a propiedades estudiadas y acudió a ésta metodología matemática en aras de la elaboración de una mecánica cuántica cuyo formalismo se remitiera a abarcar elementos puramente observables.

El formalismo desarrollado por Heisenberg, luego conocido como mecánica cuántica matricial, vendría a demostrar una potencia enorme para investigar el comportamiento de la materia subatómica. Recordemos que al interior del átomo un electrón puede “saltar” de un nivel de energía a otro mediante la absorción o emisión de un cuanto de energía, fenómeno conocido como “salto cuántico”; sin embargo, es adecuado aclarar que tal expresión resulta ser analógica, pues el electrón en realidad no “salta” a través del espacio entre uno y otro orbital, lo que sucede es que en un momento dado, un electrón puede encontrarse en un lugar concreto y en el siguiente momento reaparecer en otro lugar sin haber atravesado ningún punto intermedio. Pues bien, para poder investigar y predecir ese tipo de variaciones en la dinámica de las partículas subatómicas fue para lo que Heisenberg desarrolló el complejo formalismo matemático de la mecánica matricial.

Heisenberg tuvo que superar muchas dificultades formales para consolidar su aparato matemático. Por ejemplo, cuando se obtienen dos matrices que representan los valores de las propiedades medidas de un sistema cuántico se tiene que el producto de los valores de la matriz A por los valores de la matriz B no conmutan, es decir que su producto no es equivalente en ambos sentidos como en el caso en el que tanto 7×5 como 5×7 dan como resultado 35. Esto fue señalado inmediatamente y puesto en relación con la física clásica y la física cuántica por los investigadores cercanos a Heisenberg: “Dirac puso de relieve que la mecánica cuántica difiere de la mecánica clásica en el sentido de que las variables q y p , que representan la posición y el momento de la partícula, no se atienen a la propiedad conmutativa, sino que obedecen a la fórmula que, independientemente de Born, Jordan y Heisenberg desarrollaron”⁴⁰. Mediante éstos resultados matemáticos se comenzó a plantear la cuestión de que tal vez existan en los sistemas cuánticos ciertos pares de magnitudes que no son mensurables de manera simultánea lo cual más tarde se interpretaría físicamente mediante el principio o relaciones de incertidumbre; a pesar de tales cuestiones aun inciertas el instrumento matemático de Heisenberg funcionaba de una manera muy eficaz.

Resulta destacable evidenciar que uno de los impulsos que ayudaron a Heisenberg a resolver la necesidad teórica y práctica de encontrar un formalismo matemático totalmente nuevo para la física cuántica fue el presupuesto filosófico de que nada se puede decir más allá de lo que es directamente mensurable, además de la convicción de que para entender los procesos cuánticos debía renunciarse radicalmente a las viejas nociones florecidas en el terreno de la mecánica clásica. Se ve en el aparato formal de Heisenberg su afán por patentizar la discontinuidad cuántica y derivar de esto un supuesto indeterminismo en los procesos cuánticos. Se trata de un empirismo extremo que circunscribe el objeto de la ciencia al campo de la experiencia posible y proscribire todo aquello que

⁴⁰ KUMAR, Manjit. *Quántum: Einstein, Borh y el gran debate sobre la naturaleza de la realidad*. Barcelona: Kairós S.A., 2011. *p.* 271.

transgrede sus límites calificándolo como aseveraciones carentes de sentido o valor cognoscitivo. En apartados siguientes veremos cómo este presupuesto filosófico alimentará el espíritu de la interpretación estándar de la mecánica cuántica y su posición frente al determinismo.

Un poco después de los desarrollos formales de Heisenberg, Erwin Schrödinger postuló una ecuación de onda para describir la evolución temporal de los sistemas cuánticos de partículas basándose en el presupuesto del movimiento ondulatorio de la materia propuesto por de Broglie; tal ecuación vendría a constituirse como un núcleo formal alternativo al de Heisenberg para investigar la dinámica de las partículas subatómicas y para investigar probabilísticamente la forma en cómo cambian sucesivamente los estados de un sistema cuántico. Así, según Schrödinger, a todo cuerpo o partícula le corresponde una función de onda que existe de manera objetiva y que expresa el movimiento real de la partícula a lo largo del espacio. Brian Silver dice que el significado de la ecuación de onda de Schrödinger se puede ilustrar así: “dime qué partículas elementales hay en tu sistema, las fuerzas que actúan sobre ellas y yo las expreso en mi ecuación y, en principio, puedo darte un conjunto de expresiones matemáticas (funciones de onda) que describirán por completo tu sistema”⁴¹. Así, por ejemplo, mediante la ecuación de Schrödinger es posible obtener de manera cuantitativa las múltiples distribuciones físicas posibles de los electrones y los valores de las diferentes propiedades físicas que queremos conocer. El lugar donde emerge la cresta más alta de la onda indica certeramente, según Schrödinger, el valor de la propiedad o de la ubicación de la partícula que se necesita conocer.

Al describir el transcurrir dinámico temporal de un sistema físico cuántico, Erwin Schrödinger postuló una forma determinista de abordar la mecánica de los cuantos. Las variaciones se dan de tal manera que el estado presente de un sistema físico cuántico varía siendo determinado por un estado previo y a su vez

⁴¹ SILVER. Op. cit., p. 563.

resulta condición determinante del estado en que se encontrará en el futuro. Naturalmente, esta concatenación causal que da coherencia a los estados sucesivos de un proceso cuántico puede ser calculada mediante la ecuación de Schrödinger con cierto margen de error. Sin embargo, independientemente de nuestra medición y de nuestro acceso epistémico a los sistemas cuánticos, éstos últimos poseen una estructura determinista y causalmente coherente. Hay quienes han llegado a afirmar que la ecuación de Schrödinger es el equivalente en la mecánica cuántica de la segunda ley de Newton que representa el núcleo de la física clásica, sin embargo hay que guardar prudencia al abordar éstas analogías. La mecánica ondulatoria que Schrödinger desarrolló sirvió de alternativa al formalismo de la mecánica matricial y supuso un marco más intuitivo y sencillo para abordar la evolución de los sistemas cuánticos. Sin embargo, los científicos cercanos a la posición de Heisenberg reinterpretaron el contenido de la ecuación de Schrödinger para introducir sus convicciones de que en la mecánica cuántica rige la discontinuidad y, como veremos, el indeterminismo.

Max Born (1882-1970) hizo énfasis en el carácter puramente probabilístico de los procesos cuánticos, tomando la ecuación de Schrödinger y reinterpretándola sobre la base de ese presupuesto probabilístico y negándole a las ondas de Schrödinger una existencia objetiva, suponiendo que las mismas expresan tan solo la probabilidad abstracta de calcular una u otra propiedad de un sistema cuántico. Afirmó que mediante la obtención de las funciones de onda no obtenemos una descripción de la evolución temporal de los sistemas cuánticos sino tan sólo las probabilidades de encontrar a un electrón en uno u otro lugar o de calcular tal o cual propiedad del estado de un sistema. De esta manera, según Born es imposible describir la trayectoria de un electrón al interior de un átomo pues el movimiento de éste es absolutamente contingente: puede como no puede encontrarse en un punto x de las órbitas atómicas, puede encontrarse en un lugar como puede encontrarse en otro; es posible calcular la probabilidad de que se encuentre en uno u otro punto pero no existe una garantía de certeza con respecto

al resultado calculado. Según Schrödinger se puede, mediante su ecuación, calcular el valor de la posición de un electrón elevando al cuadrado su función de onda pero, según Born “el cuadrado de la función de onda, no nos indica la posición real de un electrón, sino tan sólo la probabilidad de encontrarlo en tal o cual región. Si, por ejemplo, el valor de la función de onda de un electrón en X dobla al de su valor en Y, la probabilidad de encontrarlo en X duplicará al de la probabilidad de encontrarlo en Y, aunque lo cierto es que puede ser encontrado en X, en Y o en cualquier otro sitio⁴²”.

En cualquier caso, es necesario resaltar la importancia de las observaciones de Born a Schrödinger, quien no aceptó en buenos términos tales observaciones; sus convicciones se inclinaban hacia un punto de vista intuitivo como el proporcionado por la física clásica, en el que rige la continuidad, la certeza y en donde las ondas expresan entidades materiales y no sólo abstracciones como sugería Born. Este último perseveró también en su reinterpretación advirtiendo que en el formalismo desarrollado por Schrödinger no se da información precisa de cómo se mueve el electrón, la ecuación de Schrödinger no expresa explícitamente el hecho de que el electrón y las partículas subatómicas en general posean trayectorias. También resaltó Born el hecho de que sólo podemos calcular ciertas probabilidades cuando indagamos acerca del paradero de un electrón. Afirmó que “debemos renunciar completamente a la representación física propuesta por Schrödinger, que apunta a la revitalización de la teoría continua clásica, y quedarnos tan solo con su formalismo matemático, rellenándolo de un contenido físico nuevo⁴³”. En las observaciones de Born concernientes a la ausencia de trayectorias en el movimiento del electrón y al carácter puramente probabilístico del comportamiento de los mismos “es donde es muy notable el rompimiento con la física clásica, y ha dado lugar a mucha especulación acerca del resquebrajamiento de la imagen

⁴² KUMAR. Op. cit., p. 295.

⁴³ *Ibíd.*, p. 293.

determinista del mundo⁴⁴” pues si, como Born afirma, no podemos hablar de la trayectoria de un electrón sino sólo de su paradero podemos ir más allá y afirmar que si bien es posible conocer los efectos de algo en particular, no podemos vincularlos a causa alguna que le preceda con lo cual se rompen los nexos causales que sustentarían una visión determinista. Así, según Kumar “Born, había esbozado una interpretación de la función de onda que desafiaba un principio fundamental de la física, el determinismo”⁴⁵.

La mecánica matricial de Heisenberg y la mecánica ondulatoria de Schrödinger fueron los desarrollos teóricos que vinieron a integrar el formalismo de la mecánica cuántica. Frente a tal situación, hubo adeptos a uno u otro de los formalismos y se esforzaron por demostrar la prevalencia explicativa de uno u otro modelo. Al parecer la mecánica matricial era más competente para investigar aquellos sistemas cuánticos en los que prevalece el comportamiento corpuscular y la mecánica cuántica para aquellos en los que prevalece un comportamiento ondulatorio. Distintos experimentos daban aval a las predicciones formuladas por ambos formalismos y, a su vez, ambos formalismos resultaban insuficientes en ciertos casos. Heisenberg, a través de su formalismo, pretendía hacer patente la discontinuidad que caracteriza a los saltos cuánticos y Schrödinger pretendía que en su formalismo hasta el desconcertante salto del electrón de una órbita a otra podía desplazarse en pro de una transición regular y continua entre una órbita permitida y otra. Así describe Manjit Kumar ésta tensión:

“Schrödinger ofrecía a los físicos una alternativa más familiar y sencilla para explicar el mundo cuántico en términos más próximos a la física del siglo XIX que la abstracta formulación de Heisenberg. En lugar de matrices, Schrödinger incluyó las ecuaciones diferenciales en la caja de herramientas matemáticas de cualquier físico. La mecánica matricial de Heisenberg apuntaba hacia saltos cuánticos y

⁴⁴ Ibid., p. 293.

⁴⁵ Ibid., p. 293.

discontinuidad y no proporcionaba nada que imaginar con el ojo de su mente cuando uno quería vislumbrar el funcionamiento interno del átomo⁴⁶.

Schrödinger no pretendió plantear una nueva forma de ver el mundo sino, por el contrario, recuperar la vieja imagen en la que quedarán reemplazados los saltos cuánticos discontinuos por transiciones continuas y regulares de una onda entre una órbita y otra; estaba firmemente convencido de que su mecánica ondulatoria le permitiría reestructurar la imagen clásica del mundo, donde la realidad física es continua, causal y determinista. Pero Heisenberg y quienes le rodeaban adelantarían una brega por forjar una imagen del mundo totalmente nueva que prescindiera de los viejos conceptos que la mecánica clásica había elaborado, y para introducir la discontinuidad y la supuesta falta de causalidad y determinismo en los procesos cuánticos elaboró su mecánica matricial. Más tarde se llegó a la sorprendente demostración de que ambos enfoques, el matricial y el ondulatorio, son completamente equivalentes a excepción de su estructura matemática: se trata de dos esquemas formales que arrojan resultados análogos para estudiar la misma realidad. Saldada esta discusión, el foco de las investigaciones se centró ya no en dilucidar el formalismo más adecuado para la mecánica cuántica sino en esclarecer el significado físico y filosófico de la teoría misma. Los científicos en general tenían, a partir de los recientes adelantos, muchas cuestiones en torno a las cuales reflexionar; estos planteamientos solo serían el comienzo de uno de los momentos más controvertidos de la historia del pensamiento científico.

2.1.5. Una indefinición inherente a la naturaleza: el principio de incertidumbre de Heisenberg

A lo largo de los apartados previos del presente capítulo hemos ido aproximándonos a algunas nociones que, en conjunto, constituyen la esencia de la física cuántica y hemos ido llegando al punto en donde el determinismo se ve

⁴⁶ KUMAR. Op. cit., p. 282.

controvertido a la luz de tales nociones. Ya podemos ir advirtiendo que científicos cómo Bohr, Heisenberg y Born canalizaron todos sus esfuerzos para resquebrajar la vieja imagen física del mundo y consolidar un marco formal explicativo totalmente nuevo que de razón de la verdadera naturaleza de la realidad elemental, en la que el determinismo está ausente según ellos. Aunque con los saltos cuánticos, la dualidad onda partícula y la reinterpretación borniana puramente probabilista de la evolución temporal de los fenómenos cuánticos ya se hace un fuerte cuestionamiento a la imagen del mundo proporcionada por la física clásica en general y al determinismo en particular, sólo mediante el principio de incertidumbre es posible comprender a cabalidad la naturaleza de tal cuestionamiento.

Bien, recordemos que en el marco de la mecánica clásica el universo se concibe de una manera rígidamente determinista en el que no caben el azar, la contingencia o la casualidad. En éste contexto cada partícula posee en un determinado instante, un momento (igual al producto de la masa por la velocidad) y una posición bien definidos. La física clásica puede calcular con infinita precisión teórica el valor simultáneo del momento y la posición de un sistema físico macroscópico; pueden presentarse errores experimentales o de cálculo pero, en principio, es posible conocer con exactitud los valores de dicho par de propiedades así como el de otros pares de propiedades determinantes del estado inicial de un sistema físico. También presupone la física clásica que la acción de las fuerzas sobre la partícula determinan unívocamente la forma en que su momento y su posición experimentan variaciones en el tiempo con lo que, conociendo las propiedades determinantes del estado de un sistema físico más las fuerzas que actúan sobre él, es posible fijar con exactitud la manera en cómo se comportará este sistema en el futuro. Estos fueron los caracteres fundamentales de la mecánica clásica que permitieron que se erigiera una imagen mecanicista y determinista del mundo. Pero a mediados de los años 20 del siglo pasado, Heisenberg, como parte de sus esfuerzos por acabar con la imagen clásica del

mundo y por explicar el comportamiento discontinuo y probabilístico de los sistemas cuánticos, planteó sus relaciones de incertidumbre o simplemente principio de incertidumbre, que constituyen el núcleo conceptual de la mecánica cuántica en el que se problematiza más evidentemente el determinismo.

Como se venía diciendo, las descripciones de los cuerpos macroscópicos que estudia la física clásica especifican su posición y sus velocidades y la precisión con que dichas variables pueden medirse solo se encuentra limitada por fallas técnicas o de cálculo que pueden corregirse para obtener mejores resultados. Pues bien, lo que postula el principio de incertidumbre de Heisenberg es que una partícula o cuerpo no puede *poseer* a la vez una posición definida con exactitud y un momento definido con precisión; en principio, resulta imposible medir simultáneamente estas dos magnitudes con precisión. “Heisenberg acababa de descubrir que la mecánica cuántica proscibía la determinación exacta, en un momento dado, de la posición y el momento de una partícula. Y es que, si bien podemos determinar dónde se encuentra exactamente un electrón o la velocidad de su desplazamiento, resulta imposible conocer ambos datos a la vez”⁴⁷. Se trata de una imprecisión en la determinación simultánea de ciertos pares de propiedades que, según la mecánica cuántica, se encuentran *conjugadas* inseparablemente.

De manera general, este principio estipula que ciertos pares de propiedades subatómicas interrelacionadas como la posición (coordenadas) y momento (producto de la masa por la velocidad) no pueden encontrarse determinadas simultáneamente con exactitud. En virtud del principio de incertidumbre, entre más claramente definido se encuentre el valor de la posición, tanto menos claramente definido se encontrará el valor del momento y viceversa, entre más definido se encuentre el valor del momento, menos definido se encontrará el valor de la posición. De esta forma, no sólo se trata de que no podamos medir

⁴⁷ KUMAR. Op. cit., p. 311

simultáneamente tales magnitudes debido a las dificultades técnicas que tenemos; lo que se está afirmando es que, por ejemplo un electrón, antes del acto de medida *no posee* en un instante dado tales valores de manera definida y que es esa la causa de que cuanto más exactamente se especifique la posición del electrón, más incierta o imprecisa será nuestra especificación de su momento y viceversa. Es la incertidumbre fundamental en la naturaleza subatómica lo que implica una consecuente imposibilidad para medir con precisión infinita y simultáneamente dichos pares de propiedades que configuran el estado de un sistema cuántico; entre más certeramente se mida el valor de la posición de una partícula subatómica, menor será la certidumbre en la medición de la velocidad y entre mayor sea la certidumbre con que se mide la velocidad, menor lo será para la posición.

Supongamos que se va a medir la posición de una partícula a lo largo de una línea denominada x . Representemos con el símbolo Δx (delta x) la incertidumbre en la medición de la posición de la partícula. Es de notarse que el valor de Δx poseerá un valor ínfimo, algo así como la décima parte de un milímetro, de tal forma que es difícil representarse una distancia más diminuta entre dos puntos. Supongamos ahora que vamos a medir el momento p de la misma partícula a lo largo de la misma línea x ; inevitablemente se obtiene una incertidumbre Δp (delta p) para el momento. A la luz de la física clásica no existen limitaciones teóricas para nuestra capacidad de reducir esas incertidumbres, es posible hacerlo mediante los progresos técnicos que perfeccionen nuestros procedimientos de medición. Pero lo que Heisenberg consideró al plantear las relaciones de incertidumbre entre ciertos pares de propiedades de los sistemas cuánticos fue muy diferente. Recordemos que en su elaboración de la mecánica matricial Heisenberg se había encontrado con el obstáculo de la no conmutatividad entre las matrices que contienen los valores que designan las propiedades de un sistema físico; pues bien, ahora todo parecía tener sentido pues, al amparo del principio de incertidumbre, resultaba que al medir ciertos pares de propiedades era imposible

reducir la incertidumbre; “es, pues, la incertidumbre inherente a la naturaleza la que yace detrás de la no conmutatividad, es decir, detrás del hecho de que $p \times q$ no sea igual a $q \times p$ ”⁴⁸. que $\Delta x \Delta p > h/2 \pi$, donde h es la constante de Planck. Esto quiere decir que es imposible reducir a cero la incertidumbre en el valor de la propiedad de un sistema cuántico. Dado el caso de que, por ejemplo Δx , la incertidumbre de la posición, sea igual a 0; entonces Δp , la incertidumbre del momento adquirirá un valor infinito. En todo caso, el producto de las incertidumbres de un par de propiedades conjugadas será irreducible a 0. Y esto, según Heisenberg será una consecuencia de que en realidad los sistemas cuánticos ostentan una indefinición esencial en sus propiedades que hace que no podamos medir ciertos pares simultáneamente y con infinita precisión. A este respecto dice Silver que “lo que establece el principio de Heisenberg es que no es posible medir simultáneamente la posición y el momento de una partícula con algún grado de precisión, no importa cuán complejo sea su aparato de medición. Esta es una propiedad de la naturaleza”⁴⁹ y, por su parte Kumar, “la incertidumbre descubierta por Heisenberg es un rasgo intrínseco de la realidad que no puede ser mejorada, debido a los límites impuestos por el tamaño de la constante de Planck y por las relaciones de incertidumbre sobre la precisión de lo que puede observarse en el mundo atómico”⁵⁰. Según esto no son los científicos quienes por alguna razón están imposibilitados para tener noticia precisa y simultánea de ciertos pares de propiedades conjugadas, es la naturaleza la que no se deja medir pues en su seno yace una indefinición esencial e incorregible.

Con base en el principio de Heisenberg podemos inferir una consecuencia muy importante: el principio de incertidumbre excluye la existencia de partículas estacionarias. Esto quiere decir que en razón de tal principio resulta inconcebible una partícula en total reposo o al margen del movimiento así sea ínfimo. Veamos, en el caso de tal partícula hipotética, no existiría incertidumbre con respecto a su

⁴⁸ KUMAR. Op. cit., p. 314.

⁴⁹ SILVER. Op. cit., p. 588.

⁵⁰ KUMAR. Op. cit., p. 313.

posición, es decir que $\Delta x=0$, debido a que se encuentra quieta, estacionada, en un punto determinado del espacio. Si esto fuera posible, entonces la incertidumbre del momento, Δp , tendría un valor infinito, lo cual significaría que el momento de la partícula puede adquirir cualquier valor de entre un rango infinito de probabilidades. Y dada la posibilidad hipotética de calcular un valor específico para el momento de ésta partícula nos chocamos con la inconsistente situación de estar calculando el movimiento de una partícula estacionaria, ya que el momento es el resultado del producto de la masa por la *velocidad*. La conclusión es que resulta imposible concebir la existencia de partículas estacionarias, a toda partícula atómica y subatómica le es inherente un movimiento irreductible lo cual sugiere que el movimiento es la forma básica de la existencia de la materia. Así, si se enfría un pedazo de metal, la violencia con que se mueven sus átomos constitutivos se reduce en proporción a la disminución de la temperatura; sin embargo existe un punto en el que la amplitud de las vibraciones de los átomos constitutivos del trozo de metal se resiste a reducirse más. Los átomos no pueden parar absolutamente su movimiento, existe un límite en la disminución de su energía que le permite moverse y por debajo del cual resulta imposible una nueva disminución, este límite se conoce como *energía de punto cero* y establece el principio de que un átomo o una partícula subatómica puede disminuir su movimiento pero nunca anularlo, existe una cantidad mínima de movimiento ineludible y que abarca a toda la materia. No sobra resaltar que esto se ha demostrado muy bien experimentalmente y es posible que ese movimiento incesante que caracteriza a las partículas atómicas y subatómicas esté relacionado con la indefinición esencial que ostentan ciertos pares de variables conjugadas que atribuyen un estado específico a un sistema cuántico, pues proscribte tajantemente la existencia de partículas estacionarias, esto es, que se encuentren localizadas en un punto específico del espacio.

Volviendo a tomar las repercusiones del principio de incertidumbre para la visión determinista del mundo que se había erigido sobre la base de la física clásica,

resulta evidente que el postulado de Heisenberg entra en contradicción con los presupuestos fundamentales del determinismo clásico. Mientras que en la mecánica clásica resulta que los sistemas físicos poseen propiedades bien definidas que configuran su estado, en la mecánica cuántica no; y, mientras que en la mecánica clásica es posible, en principio, medir, conocer y predecir con exactitud cómo será el despliegue de un sistema físico, en la mecánica cuántica no. Incluso uno de los postulados nucleares de la lógica formal, *el principio del tercio excluido*, se ve soslayado como consecuencia del principio de incertidumbre pues cuando se intente obtener información sobre el valor de una propiedad como la posición o el momento la respuesta será una situación semántica polivalente que constituye una “refutación” del principio de la lógica mencionado. M.L. Dalla Chiara y Toraldo di Francia, considerando que existen al menos tres casos posibles en las determinaciones cuantitativas de las propiedades cuánticas, ilustran ésta situación de la siguiente manera:

1. Un estado puro s verifica una propiedad P , porque asocia a P un valor de probabilidad 1;
2. el estado puro s falsa P , porque asocia a P un valor de probabilidad 0;
3. en el estado puro s la propiedad p permanece indeterminada, porque s asocia a P un valor de probabilidad distinto de 1 como de 0. Tertium datur! (se da un tercer caso)⁵¹.

La incertidumbre y lo probabilístico son, según el determinismo de la física clásica, síntomas de la limitación epistémica de los seres humanos o de sus errores en el cálculo o la experimentación. Sin embargo, en la mecánica cuántica resultan ser propiedades irreducibles e inherentes a los sistemas cuánticos, “la imposibilidad, por ejemplo, de determinar el momento exacto en que un átomo concreto de una muestra radiactiva se degrada y la certeza de que alguno podría hacer no se deben a una falta de conocimiento, sino que son el resultado de la

⁵¹ DALLA Chiara, M.L., y, FRANCIA, Toraldo di. Introducción a la filosofía de la ciencia. , Barcelona: Editorial Crítica, 2001. p. 141.

naturaleza probabilística de la regla cuántica que rige el proceso de degradación radiactiva”⁵². En la física cuántica se nos devela, pues, un universo bastante distinto del de la física clásica.

El determinismo, en la manera en que se había desarrollado sobre la base de la física clásica, resultó fuertemente lesionado. Recordemos que en la física clásica, un presupuesto necesario para sostener el determinismo, es que un sistema físico x posea unas condiciones específicas y unas fuerzas que, actuando sobre él, determinan su estado subsecuente. Pues bien, el principio de Heisenberg deslegitima la posibilidad de establecer con exactitud y simultáneamente ciertos pares de propiedades determinantes del estado de un sistema y si en principio los sistemas cuánticos ostentan una indefinición esencial en ciertas propiedades será complejo tratar el problema de cómo cambiarán en momentos posteriores.

La problematización del determinismo resulta estar relacionada de manera profunda con el problema de la medición de los sistemas cuánticos. Lo que proporcionan las mediciones de las propiedades de los sistemas cuánticos parece impedir la representación de la estructura coherente del movimiento a escala subatómica, y recordemos que desde la perspectiva de Heisenberg la física debe limitarse a tratar con los datos cuantitativos que se obtienen a partir del proceso de medición, sin intentar especular acerca de la realidad que subyace a los fenómenos experimentados. En el siguiente capítulo se tratan las relaciones que existen entre el problema de la medición en física cuántica y el determinismo para tratar de esclarecer cómo se problematiza esta noción en tal contexto.

⁵² KUMAR. Op. cit., p.296.

Capítulo 2

El determinismo y el problema de la medición en física cuántica

Se ha expuesto en el capítulo anterior un esbozo de los aspectos generales del desarrollo de la física cuántica procurando hacer explícitos aquellos aspectos que cuestionan la noción de determinismo fundamentada en la física clásica. Hasta este punto resultan sobresalientes aspectos como la discontinuidad, la dualidad onda-partícula, el carácter probabilístico del comportamiento de los sistemas cuánticos y, en especial, el principio de incertidumbre postulado por Heisenberg. Cada uno de estos tópicos resulta fundamental para comprender la tensión entre determinismo e indeterminismo que se va a acentuar en el curso de los años subsecuentes a la consolidación del aparato formal de la física cuántica; y, en el debate teórico, tal tensión se mantiene vigente aún en estos días. No obstante es necesario que examinemos también el problema de la medición en la física cuántica pues, como se verá a lo largo de éstos apartados, gran parte de la problematización del determinismo proviene de las interpretaciones que se han suscitado entorno al problema de la medición pues de ella se desprenden otros aspectos sorprendentes que desafiarán la visión determinista tradicional. Así, aunque el principio de Heisenberg ya presenta problemas para la medición al estipular la imposibilidad de conocer simultáneamente y con precisión ciertos pares de variables veremos en lo que viene que éste problema puede agudizarse aún más.

2.2.1. Una imagen difusa de los sistemas cuánticos: la superposición de estados

Además del principio de incertidumbre, uno de los núcleos conceptuales problemáticos para el determinismo, existe una situación cuántica que se traduce en dificultades para el acto de medida. Se trata de una característica de los sistemas cuánticos conocida como superposición de estados. Cuando un científico

busca medir un sistema cuántico se va a encontrar con el principio de superposición, que atribuye una indefinición esencial de los sistemas cuánticos con respecto a la adquisición de un valor específico que se encuentra distribuido entre un rango de probabilidades y que designa un posible estado. “En general, un estado puro sólo determina un conjunto de propiedades posibles, acompañadas por un cierto valor de probabilidad”⁵³. Esto implica a su vez que un sistema cuántico no evoluciona a través del tiempo en un solo sentido sino hacia el más probable, lo cual quiere decir que alberga, en potencia, varios sentidos probables en dirección a los cuales evolucionar, pero antes de “decidirse” el sentido en que evolucionará el sistema, éste mismo contiene simultáneamente todos los sentidos posibles hacia los cuales se encuentra en susceptibilidad de evolucionar. Hagamos esto más simple a través de una analogía tomada del mundo macroscópico que resulta un tanto inexacta pero resulta satisfactoria para ilustrar la idea general. Tome una moneda a manera de sistema físico sobre el cual va a realizar una observación (medición). Suponga que lanza la moneda de forma giratoria hacia el aire y luego realiza una observación para mirar si cae cara o sello. Para hacer esto debe atrapar la moneda en el aire y ponerla sobre su mano de manera horizontal para ver si el “estado final” de la moneda corresponde a cara o sello. Supongamos que después de observar, corrobora que cayó sello; suponga que al notificar de qué lado cayó la moneda está realizando un acto de medición en el que, para especificar el estado de la moneda debe ponerla de manera horizontal. Ahora bien, en el momento en el que la moneda se encuentra girando en el aire, su estado no corresponde ni a cara ni a sello puesto que no se encuentra de manera horizontal y estable. Pues bien, si quisiera definir el estado de la moneda cuando se encuentra en el aire se puede decir que el estado corresponde a una combinación de los dos estados posibles, cara y sello. Decimos que el sistema, la moneda, se encuentra en una superposición de estados puesto que se encuentra en una indefinición esencial con respecto a sus dos estados posibles. Se podría decir también que en el momento en que la

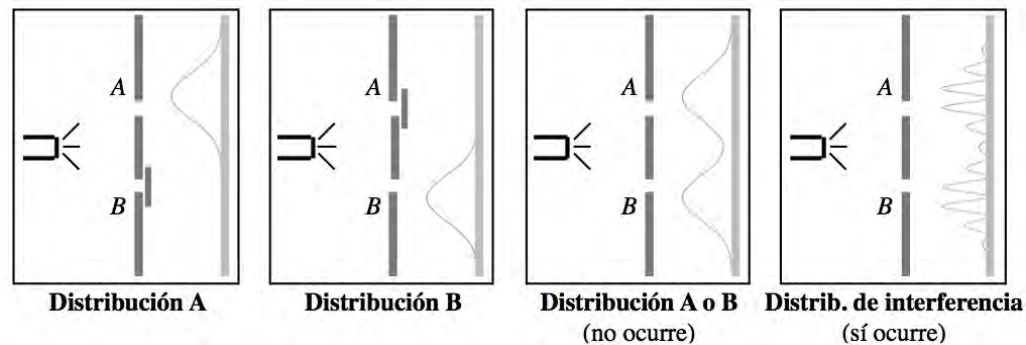
⁵³ DALLA y FRANCIA. Op. cit., p. 141.

moneda no es puesta sobre una superficie horizontal para observar su estado, ésta se encuentra en una mezcla de estados 50% cara y 50% sello o que su estado no corresponde ni a cara ni a sello sino a ambos al mismo tiempo. De cualquier manera se puede ir viendo en ésta analogía cómo también el principio de superposición de estados implica una trasgresión del principio lógico-formal del tercero excluido puesto que tal situación física encierra una indefinición que no se resuelve solamente por dos valores probables sino entre un espectro más amplio de probabilidades.

Ahora, llevando el principio de superposición de estado al lugar que le es propio, esto es, a la mecánica cuántica, se observan las implicaciones en toda su complejidad. Todo sistema cuántico y sus componentes poseen un conjunto de propiedades, por ejemplo, el espín, el momento, las coordenadas, la energía, etc. Pues bien, cada propiedad es susceptible de adquirir uno u otro valor de entre un rango bien definido de probabilidades. En determinados instantes, una propiedad p de un sistema s , contiene en sí todos los posibles valores que está en condiciones de adquirir; es decir contiene simultáneamente todos los estados hacia los cuales puede dirigirse en su transcurso. El hecho de que una propiedad determinante del estado de un sistema cuántico pueda adquirir uno de entre muchos valores que en principio le corresponden y que se encuentran distribuidos entre su espectro propio de probabilidades es la esencia del principio de superposición de estados y el hecho de que los sistemas cuánticos se encuentren por lo general en una permanente superposición de estados es lo que determina su carácter probabilístico. Esto implica, por ejemplo, que un electrón pueda estar localizado en múltiples coordenadas a la vez o, lo que es equivalente, que no se encuentre concretamente en ninguna de ellas; o que una partícula se encuentre en potencialidad de seguir múltiples trayectorias posibles, o que las propiedades determinantes del estado de los sistemas cuánticos como el espín o el momento angular se encuentren indefinidas entre un rango de varias magnitudes que contiene en potencia y de manera simultánea. Así resulta paradójico afirmarlo pero

el principio de superposición estipula que todo estado en los sistemas cuánticos es una superposición de estados, una combinación de todos los estados posibles hacia los cuales un sistema específico puede devenir.

A todo sistema cuántico le corresponde un conjunto de estados propios probables que contiene simultáneamente y hacia los cuales deviene de manera probabilista para, una vez adquirido un determinado estado de entre varios antes distribuidos entre su rango de estados propios probables, adquirir una nueva superposición de estados propios. Ilustremos la superposición cuántica de estados a través de uno de los experimentos más conocidos de la física cuántica: el experimento de doble rendija⁵⁴:



Este experimento se constituye de tres elementos básicos: un dispositivo que dispara electrones en distintas direcciones, una pared con dos rendijas (A y B) a través de las cuales pueden pasar los electrones y una pantalla al final con detectores que especifican el lugar donde van a chocar los electrones. El experimento consiste en hacer que el dispositivo lance una cantidad considerable de electrones hacia la pared que contiene las dos rendijas estudiando primero qué sucede en la pantalla final de los detectores cuando se deja una de las dos rendijas abiertas y luego probando qué sucede cuando se dejan abiertas ambas rendijas.

⁵⁴ Imagen tomada del texto de OKON, Elias El problema de la medición en mecánica cuántica. Coyoacán: Instituto de Investigaciones Filosóficas, Universidad Autónoma de México, 2014. p. 5.

Pues bien, como se observa en la gráfica, cuando se deja abierta una sola de las rendijas, después de que el dispositivo lance un gran número de electrones, la distribución obtenida resulta como en los dos primeros casos en la cual, los electrones van a parar de manera más acentuada en donde se encuentra más alta la cresta de la onda. Veamos qué sucede cuando se dejan abiertas ambas rendijas. Se esperaría que el resultado obtenido fuera como en la tercera distribución que es una simple suma de las dos circunstancias anteriores, cuando sólo se dejaba abierta la rendija A o la rendija B, pero esto no sucede así: el resultado obtenido se esquematiza en la cuarta gráfica que corresponde a una distribución de interferencia. Lo que subyace tras esta situación es que si los electrones son lanzados a través de una sola de las rendijas tendrán la posibilidad de ir a parar a unos puntos específicos de la pantalla detectora, situación que cambia cuando varían las condiciones, en este caso dejar abiertas ambas rendijas.

Resulta significativo resaltar que esto sucede aun cuando los electrones son lanzados uno por uno; el cambio de las condiciones en la apertura de las rendijas evidencia que en el momento inmediatamente previo a atravesar las rendijas el electrón se encuentra en una superposición de estados específica en la que su trayectoria puede atravesar A o B.

Resulta muy complicado preguntarse por la trayectoria que toma cada electrón en particular si el experimento se lleva a cabo con las dos rendijas abiertas. No se puede afirmar que el electrón siga una de las dos trayectorias puesto que en tal caso se obtendría una distribución como en los dos primeros cuadros de la gráfica, lo cual experimentalmente no sucede. Si el electrón siguiera ambas trayectorias de manera simultánea, atravesando ambas rendijas a la vez, se obtendrían ambas detecciones en la pantalla, cosa que tampoco sucede, tal detección siempre se da en uno solo de los dos puntos. Además, si se pusieran detectores en ambas rendijas también sería una de las dos rendijas la que detectaría el paso del

electrón, sin embargo el resultado seguiría siendo el patrón de interferencia en la pantalla donde van a parar los electrones. La mecánica cuántica explica esto a través del principio de superposición de estados arguyendo que los sistemas cuánticos no ostentan estados físicos bien definidos sino un conjunto de probabilidades que constituyen estados propios hacia los cuales desplegarse. El hecho de que los sistemas cuánticos estén caracterizados por la superposición de estados indica que su transcurrir no se presenta siempre en el mismo sentido y con la misma regularidad. Es la probabilidad la que se encuentra en el núcleo del comportamiento de los sistemas cuánticos, los cuales, en lugar de evolucionar temporalmente en un sentido siempre regular y unívoco, se comportan de tal forma que evolucionan hacia uno de los estados previamente distribuido entre su rango de probabilidades, esto es, en sentido multívoco.

Tenemos aquí otro punto de quiebre entre los sistemas macroscópicos que estudia la física clásica y los sistemas ultramicroscópicos que estudia la mecánica cuántica. En el mundo macroscópico con el que estamos habituados no se observan estados superpuestos en las formas concretas de existencia de las cosas; los sistemas clásicos exhiben una realidad relativamente consistente y bien definida que, aunque sujeta inherentemente al cambio, posee una definición relativamente estable entre los diversos estados que experimenta sucesivamente en el transcurso de su existencia. Además, los sistemas físicos que constituyen el objeto de estudio de la física clásica evolucionan de una manera generalmente regular, es decir, los mismos estados predeterminan un despliegue prácticamente inequívoco hacia otros estados correspondientes bajo la influencia de las mismas leyes. Esto no sucede con los sistemas cuánticos, cuyo comportamiento se ciñe a la probabilidad de ocurrencia sustentada en el principio de superposición de estados. El experimento mental del gato de Schrödinger resulta apropiado para ilustrar las implicaciones que acarrearía asumir la superposición de estados en los cuerpos macroscópicos. Pronto volveremos sobre este ejemplo. Por el momento basta con advertir que en el mundo habitual no encontraremos un gato, o

cualquier otro animal, que se encuentre en una superposición de estados, por ejemplo, simultáneamente vivo y muerto; pero si nos remitimos a los sistemas cuánticos tenemos que el estado propio de los mismos sí es una superposición de todos los posibles estados propios distribuidos entre un rango específico de probabilidades. Hay que resaltarlo: el postulado del tercero excluido, propio de la lógica formal y perfectamente coherente con la física clásica resulta insuficiente para estudiar los sistemas de la física cuántica.

Ahora bien, esto resulta problemático para el determinismo, al menos en su forma clásica, pues si se tiene en cuenta que éste requiere de unas condiciones bien definidas y de las leyes que actúan sobre un sistema específico, nos encontramos con que los sistemas cuánticos carecen de unas condiciones definidas que especifiquen rigurosamente un estado a partir del cual el sistema evolucionará. “El país de los cuantos es el mundo del quizá o del puede ser. El mismo concepto de encontrarse en un cierto lugar adquiere un significado completamente distinto a la física clásica. En general, una partícula cuántica no es localizable en una región precisa del espacio. Pero podría estar aquí, allí, en cualquier parte...Y cada <<podría>> va acompañado por un preciso valor de probabilidad”⁵⁵. Por otra parte, los sistemas cuánticos poseen una evolución temporal por medio de la cual adquieren determinaciones; es decir lo que en un principio es una superposición de estados se define en el transcurso de la evolución temporal del sistema cuántico mediante el “salto” que realiza para adquirir un estado propio antes distribuido entre un rango definido de probabilidades. Lo que resulta desconcertante es que el estado propio, antes sólo probable, por el cual se “decide” el sistema cuántico elimina la superposición de estados previa pero introduce al sistema en una nueva superposición de estados a la cual le corresponde un nuevo rango de probabilidades de estados propios hacia los cuales desplegarse. Pero ¿cuándo o cómo un sistema cuántico “sale” de una superposición de estados? Cuando un sistema cuántico en superposición de

⁵⁵ DALLA y FRANCIA. Op. cit., p. 143.

estados se decanta por uno de los valores antes distribuidos entre su rango propio de valores probables se dice que su estado “colapsa”. En este orden, ¿Qué produce el colapso de estado? Analicemos esto en el apartado que viene en seguida.

2.2.2. Una salida abrupta de la superposición: el colapso de estado.

El principio de superposición plantea una dificultad para especificar los valores de las propiedades que permiten fijar el estado de un sistema cuántico en un momento dado. Esos valores de las propiedades determinantes del estado de un sistema cuántico se encuentran indefinidos entre rangos de valores probables que podrían ser adquiridos. Ahora bien, las propiedades de los sistemas cuánticos, en su transcurso, salen de su condición superpuesta y adquieren valores específicos, antes ubicados entre rangos definidos de valores probables correspondientes a una determinada propiedad. Esto quiere decir que la previa indefinición propia de los estados superpuestos se resuelve mediante la adquisición de un nuevo estado antes sólo probable. No olvidemos que en los sistemas cuánticos todo estado es una superposición de estados. Ahora, cuando la propiedad de un sistema se define por uno u otro de los valores distribuidos previamente en su espectro de probabilidades se dice que sucede un colapso de estado o, más técnicamente, un colapso de la función de onda del sistema cuántico.

El colapso de estado o colapso de la función de onda consiste en la variación abrupta en el estado de un sistema cuántico. Esto significa que los valores de algunas propiedades que fijan el estado de un sistema cuántico adquieren un valor definido de entre muchos otros valores probables que antes se superponían junto al valor ahora definido. Las propiedades que fijan el estado de un electrón al interior del átomo pueden encontrarse indefinidas en un instante específico. Supongamos, por ejemplo que la propiedad del espín posee simultáneamente los valores 1, 2 y 3 y que la propiedad del momento posee simultáneamente los

valores 7, 8 y 9; pues bien, en otro instante de su transcurrir, las propiedades determinantes del estado del electrón se definirán por uno de esos valores probables, supongamos: 2 para el espín y 8 para el momento, con lo cual el estado del sistema queda también definido. Pero, ¿qué es lo que produce el colapso de estado?, ¿cómo es que un estado superpuesto se transforma en un estado definido?

Lo que nos dicen Heisenberg, Bohr, Born y otros es que los sistemas cuánticos se encuentran en una superposición de estados hasta que se produce un acto de medición que provoca que unas u otras propiedades determinantes del estado de un sistema cuántico se definan por uno u otro de sus valores probables. En esta perspectiva es el acto de medición lo que provoca el salto abrupto de un estado superpuesto a un estado definido. Recordemos la analogía de la moneda moviéndose de manera giratoria en el aire. En este caso, mientras no se realice una “medición” sobre el sistema físico (la moneda) es imposible decir que el mismo posea un estado definido, bien sea cara o sello. Mientras el objeto no se ponga sobre una superficie plana y de manera horizontal, de modo que podamos tener noticia de qué lado se encuentra a nuestra vista, el sistema se encuentra en una combinación de estados cara y sello, esto es, en un estado superpuesto. Sin embargo, en el momento en que ponemos la moneda sobre una superficie plana y horizontal y observamos, “medimos” el estado del sistema, nos encontramos con que la previa superposición de estados cara-sello se anula para colapsar en uno sólo de esos estados propios del sistema, bien sea cara o sello pero nunca los dos a la vez.

Ahora bien, pasando de la analogía al terreno donde se circunscribe el principio de colapso de estado, en el contexto de la física cuántica nos encontramos con que para Bohr, Heisenberg, Born y sus copartidarios, los sistemas cuánticos no poseen propiedades y, por lo tanto, estados definidos en tanto no se lleve a cabo un proceso de medición. Según ellos, es absurdo hablar de la trayectoria de un

electrón o de su posición e incluso de su existencia independientemente del acto de medición; no hay nada que podamos decir de un sistema cuántico antes de la medida, sólo podemos establecer el resultado que se produce en el instante inmediatamente después de la medida. Hablar del pasado de un sistema cuántico resulta, bajo esta perspectiva, un sinsentido, puesto que antes de la medida el sistema se encuentra en una superposición de estados y sólo cuando ésta, la medida, es realizada se produce el colapso de estado. También se le conoce a este proceso como colapso de la función de onda porque, según Born, la ecuación de onda de Schrödinger representa un rango de probabilidades que se disuelven cuando se lleva a cabo la medición, con lo que la función probabilística de onda queda también disuelta. Así lo ilustra Bryan Silver: “En el mundo de las partículas pequeñas, lo que usted mide es el estado en el que el sistema está *después de la interacción con el aparato de medición*. Por lo general destruye el estado en que el sistema estaba antes de la medición, y al hacerlo se pierde toda esperanza de saber cuál era su estado”⁵⁶. Así, bajo esta perspectiva, un sistema cuántico se encuentra generalmente indeterminado antes de medirlo tal como la moneda que se encuentra girando en el aire antes de ser puesta sobre una base horizontal.

En todo caso, más allá de asumir la interpretación de que la medición es la que produce el colapso de estado, se puede notar aquí la existencia de una contradicción entre dos postulados básicos de la física cuántica: la ecuación de Schrödinger y el principio de colapso de estado o de la función de onda. Recordemos que la ecuación de Schrödinger describe cómo evolucionan temporalmente los estados de los sistemas físicos y está representada por una ecuación diferencial determinada. Sin embargo, Ya Max Born había señalado que los estados cuánticos representan conjuntos de informaciones probabilísticas de los sistemas físicos bajo estudio. “A pesar de ello, la ecuación de Schrödinger es determinista, en el sentido de que: fijado un estado en un cierto instante, la

⁵⁶ SILVER. Op. cit., p. 575.

ecuación determina la evolución de ese estado y la distribución de probabilidad a la que da lugar-para cualquier otro instante futuro o pasado”⁵⁷.

La ecuación de onda representa pues la ley dinámica de la mecánica cuántica. Se trata de una ecuación lineal y determinista que nos permite, en un tiempo dado, calcular los cambios experimentados por un sistema cuántico en sus instantes posteriores. Siguiendo a Elias Okon, *“es importante reiterar que la ecuación de Schrödinger es completamente determinista, de manera que si se conoce el estado del sistema en un tiempo dado ésta permite determinar con certeza el estado en tiempos posteriores. No es aquí entonces donde aparecen las probabilidades en la mecánica cuántica”*⁵⁸. Tuvo que llegar Max Born, como se había señalado, para reinterpretar probabilísticamente la ecuación de Schrödinger y tratar de exponer la conexión existente entre el formalismo y la medición en la física cuántica. Born introduce una regla a través de la cual se proporciona, por un lado, una lista de los posibles estados de la medición y, por otro lado, la probabilidad de que al medir, obtengamos uno u otro de éstos posibles estados⁵⁹. Es Born quien comienza a defender la idea de que los procesos cuánticos son puramente probabilísticos. Además de señalar que en la ecuación de Schrödinger sólo se describe una evolución determinista cuando un sistema cuántico no se encuentra bajo medición, introdujo en la ecuación un contenido físico probabilístico y fue más allá, agregando que en cambio, cuando se realiza un acto de medición el estado del sistema colapsa, se define abruptamente por un estado propio antes meramente probable. Ante un fenómeno tan desconcertante como el colapso en la función de onda, Heisenberg y compañía sugirieron que a través de él se hace evidente la discontinuidad en los sistemas cuánticos, aspecto que según tal postura, rompe con la regularidad en la dinámica de tales procesos físicos, abriendo la posibilidad para la introducción del indeterminismo. Esta interpretación

⁵⁷ DALLA y FRANCIA. Op. cit., p. 141.

⁵⁸ OKON, Elías. El problema de la medición en mecánica cuántica. Coyoacán: Instituto de Investigaciones Filosóficas, Universidad Autónoma de México, 2014. p.8.

⁵⁹ Para revisar una explicación más pormenorizada revisar el texto de Elías Okon.

que atribuye al acto de medición el papel fundamental en la producción de un colapso de estado se encuentra relacionada con el hecho de que, en los sistemas cuánticos, el efecto de un acto de medición sobre un sistema físico cuántico medido provoca en él una alteración no despreciable, lo que no se observa con los sistemas estudiados por la física clásica, en los cuales es posible medir sus estados sin que estos se vean alterados por el acto de medida. Se volverá pronto sobre este asunto.

Ante la explicación del colapso de estado proporcionada por Bohr, Heisenberg, Born y otros, se levantaron perspectivas contrarias que consideraron inaceptable que se vea en el acto de medición la razón por la cual se sucede la salida abrupta a la superposición de estados. Resulta sobresaliente la posición de Schrödinger que, por un lado, rechaza la reinterpretación probabilística borniana de su ecuación de onda y, por otro lado, considera paradójico e inconsistente que la medición provoque el colapso de la función de onda y, por lo tanto la definición de un sistema físico por uno de sus estados distribuidos entre su rango propio de probabilidades. Es famoso el experimento mental que ideó Schrödinger para mostrar el carácter paradójico que implicaría la asunción del colapso de estado como consecuencia de la medición, y las implicaciones que tendría tal situación para los sistemas macroscópicos:

Se encierra a un gato en una cámara de acero, junto a la siguiente máquina diabólica (que debe protegerse contra la interferencia directa del gato): en un contador Geiger hay una pequeña cantidad de una sustancia radioactiva, tan pequeña que quizás en el transcurso de una hora uno de sus átomos decaiga, pero también, con igual probabilidad tal vez ninguno lo haga; si esto sucede, el tubo del contador se dispara y por medio de un relé libera un martillo que despedaza un pequeño frasco de ácido hidrocianídrico. Si se ha dejado este sistema sólo por una hora, puede afirmarse que el gato aún vive si mientras tanto el átomo no ha decaído. El primer decaimiento atómico lo habrá envenenado. La función de onda

de todo el sistema expresaría este hecho teniendo en ella al gato vivo y al muerto mezclados o difuminados en partes iguales⁶⁰.

De esta forma, si aceptamos que la realidad de un sistema en superposición de estados sólo se define mediante el acto de medición habría que aceptar la conclusión poco consistente de que mientras no abramos la caja debemos aceptar que el gato se encuentra vivo y muerto simultáneamente. Frente a esta situación, habría que considerar la posibilidad de que al interior de la caja las cosas se decidan de manera independiente al acto de observación pues el hecho definitorio del destino del gato es la probabilidad de que la sustancia radiactiva se descomponga o no. La aparente indeterminación sería trasladada, bajo la perspectiva de Schrödinger, del ámbito objetivo de los procesos cuánticos al ámbito de nuestras mediciones, o sea de nuestro acceso epistémico a dichos sistemas. Para Schrödinger, si bien es inevitable la interacción entre el proceso de medición y el estado del sistema cuántico a medirse, no debe de ello inferirse la indeterminación esencial de los procesos cuánticos sino nuestras dificultades prácticas para tener noticia de cómo tales proceden auténticamente. “En manos de Schrödinger, el problema de la medición se convierte en un problema acerca de nuestras teorías, de su alcance, sus límites y su aplicabilidad, no acerca de la constitución del mundo”⁶¹. Declara Schrödinger que después de todo, “existe una diferencia entre una fotografía corrida o fuera de foco y una foto clara de nubes y bancos de niebla”⁶², refiriéndose a las dificultades que implica nuestro acceso epistémico a las profundidades del mundo atómico y rechazando la existencia de una indefinición esencial en los procesos cuánticos y la salida abrupta de esa misma indefinición a causa del acto de medida como suponían Bohr, Heisenberg, Born y otros.

⁶⁰ CALA, Favio y ESLAVA, Gustavo. Mecánica cuántica, sobre su interpretación, historia y filosofía. Bogotá: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 2011. p. 28.

⁶¹ *Ibíd.*, p. 32.

⁶² *Ibíd.*, p. 27.

Por otra parte, la cuestión de especificar la razón por la cual se produce el colapso de estado en los sistemas cuánticos ha resultado problemática hasta nuestros días y la aceptación de que el colapso se explica en función del acto de medida ha resultado insatisfactoria para algunos científicos. Más recientemente, a partir de 1985 comenzaron a elaborarse interpretaciones alternativas al colapso de estado planteándose las denominadas “*teorías de colapso objetivo*”. La más reconocida de estas reinterpretaciones del colapso de función de onda es la teoría de Ghirardi-Rimini-Weber quienes consideran insuficiente la explicación de que el colapso de estado se produzca únicamente en el acto de medición planteando que esto implicaría asumir una perspectiva puramente subjetivista incapaz de abordar el problema sobre bases reales.

La interpretación GRW difiere de Bohr Heisenberg y Born al plantear que el colapso de la función de onda se produce de manera objetiva y espontáneamente. En esta perspectiva se sugiere que, si bien el acto de medida puede producir el colapso de estado, este es un caso especial y marginal del carácter generalmente objetivo y espontáneo de los colapsos de estado. En este contexto interpretativo se dice que para partículas individuales estos colapsos acaecen de manera probabilística en un momento dado con cierta probabilidad pero nunca con absoluta certeza. Además, dicen que los sistemas cuánticos más complejos compuestos por grupos de partículas se comportan de manera regular pero con base en parámetros estadísticos. Sin embargo añaden que la frecuencia de estos colapsos espontáneos es mínima pero que incrementa en función del número de partículas involucradas en los sistemas cuánticos; con esto se tendría que, para una partícula individual, los colapsos de estado se suscitan una vez en muchos millones de años pero, para los cuerpos macroscópicos, el colapso se presenta en un orden mucho más frecuente, razón por la cual sistemas físicos macroscópicos detentan aparentemente una existencia consistente cuyos estados subsecuentes parecen estar bien definidos y libres de la superposición privativa de los sistemas ultra-microscópicos. Así, GRW acepta el principio de superposición cuántica de

estados y el hecho de que esta situación se resuelve siempre por un único resultado dado en el momento del colapso. Tal interpretación busca evitar una interpretación subjetivista frente al colapso de la función de onda pero no ofrece una explicación clara acerca de si la evolución que va de la superposición al colapso de estado ocurre de modo determinista o no.

En todo caso, en el postulado del colapso es donde muchos (Bohr, Heisenberg, Born, etc.) avizoran el presunto indeterminismo inherente a la dinámica de los sistemas cuánticos en todo su esplendor. El argumento en que se basan las interpretaciones aledañas al indeterminismo es que en el momento del colapso se suscita un procedimiento absolutamente aleatorio mediante el cual un sistema cuántico se “decide” por uno u otro de los estados físicos previamente superpuestos y asociados a un rango específico de probabilidades de ocurrencia. Bajo esta perspectiva se ha sostenido la ausencia de un condicionamiento causal en los procesos cuánticos optándose por una supuesta espontaneidad acausal inherente al despliegue de dichos procesos. Un electrón, un fotón “deciden libremente” atravesar, por ejemplo, una u otra de las dos rendijas en el experimento previamente ilustrado; no existen factores a los cuales se encuentren conectados en el pasado que permitan describir una coherencia determinista en la que los diferentes estados sucesivos se encuentren mediados por nexos causales; lo único que podemos obtener al estudiar los sistemas cuánticos es una imagen en la cual los acontecimientos ultra-microscópicos se perciben únicamente como transiciones indeterministas, discontinuas entre estados cuánticos discretos.

Según Bohr, Heisenberg y Born, el principio de colapso, cuya justificación ven dichos científicos en el acto de medición, irrumpe con las cadenas causales que unen coherentemente los estados sucesivos que configuran un proceso cuántico. Cada estado cuántico de un mismo sistema estaría desligado de su estado anterior y posterior puesto que la discontinuidad y la aleatoriedad implicada por los colapsos sucesivos descarta la posibilidad de una articulación causal necesaria

entre uno y otro de los estados constitutivos del proceso en el que experimenta sucesivas variaciones. Al estipular los científicos mencionados que el colapso de estado acaba con el determinismo y la causalidad en los procesos cuánticos, y que tal irrupción abrupta es provocada por la medición, caen, sin embargo en un contrasentido que ya Karl Popper señaló diciendo que Heisenberg “trata de dar una explicación causal de por qué son imposibles las explicaciones causales”⁶³ en la física cuántica, pues se está asumiendo implícitamente que existe una causa, la medición, que produce un efecto: el colapso de estado.

2.2.3. La medición como una perturbación inevitable del estado de los sistemas cuánticos

Aunque es actualmente discutible la razón por la cual suceden los colapsos de estado o de la función de onda de los sistemas cuánticos es necesario señalar la veracidad del hecho de que el acto de medida genera perturbaciones no despreciables sobre los sistemas cuánticos medidos. En la física clásica se tenía la plena seguridad de que un acto de observación no podía afectar el estado del sistema físico bajo estudio; cuando se miden magnitudes correspondientes a sistemas macroscópicos como un cuerpo cayendo a cierta velocidad, un gas encerrado en un cilindro o un planeta orbitando, la interacción entre el objeto medido y el aparato de medición se da sin perturbaciones apreciables en los resultados obtenidos. Esto resulta insostenible en el contexto de la física cuántica pues en ella, como se esbozará, el acto de medición resulta irrumpir significativamente sobre los sistemas medidos provocando alteraciones no despreciables que impiden obtener información directa de los “estados puros” de los sistemas bajo medición. Una diferencia más con la física clásica.

Si se realiza un experimento para medir las propiedades observables de un sistema cuántico, por ejemplo su velocidad V , se obtendrá un valor determinado

⁶³ POPPER, Karl R.. Lógica de la investigación científica. Madrid: Editorial Tecnos, 1959. p. 249.

para dicha propiedad observable, supongamos $V=3$; se dice, en este caso, que el valor de la propiedad medida estipula el estado del sistema. No obstante, la especificación del estado de tal sistema mediante la cuantificación experimental de una de sus propiedades definitorias, resulta únicamente válida para instantes inmediatamente posteriores al acto de medición pero no proporciona ninguna información acerca del estado del sistema en los instantes previos al acto de medición. “En efecto, todo experimento implica una interacción entre el sistema que se está observando y ciertos aparatos de medida apropiados. Durante dicha interacción hay intercambio de energía entre el sistema y el aparato. Por más pequeño que sea el intercambio, el proceso de medición implica una acción que, según aquella ley fundamental de la naturaleza, no puede ser menor que h , la constante de Planck”⁶⁴. Según esto, cualquier medición realizada sobre un sistema cuántico lo perturbará de tal modo que se anulará toda la información con respecto a su estado antes del proceso de medición; nada hay que se pueda saber acerca del estado de un sistema cuántico más allá del acto de medida pues “la observación experimental de una propiedad deja al sistema cuántico en el estado correspondiente a la misma, pero nada dice sobre el estado del sistema antes de la observación”⁶⁵.

De esta manera al medirse las propiedades que fijan los estados sucesivos de un sistema cuántico se necesitan hacer diferentes mediciones en distintos momentos de tiempo específicos. Esto implica que por cada medición realizada sobre un sistema cuántico en diferentes momentos de su despliegue, se producirán diferentes perturbaciones obteniéndose resultados inconexos entre sí, de tal modo que en una sucesión de instantes a , b , y c , al medir el valor de las propiedades determinantes del estado cuántico en el instante b , se obtendrá una variación abrupta e inconexa con los datos obtenidos en el instante a , lo mismo que sucederá con la información obtenida en el instante c , con respecto al instante b .

⁶⁴ TORRE, Alberto Clemente de la. Física cuántica para filósofos. México D.F.: Fondo de Cultura Económica, 2000. p. 57.

⁶⁵ *Ibíd.*, p. 58.

Esto se debe a que el proceso de medición en la física cuántica no proporciona como resultados “estados puros” (aunque como vimos los estados cuánticos se rigen por el principio de superposición); el resultado de toda medición cuántica será la suma del “estado puro”, aunque superpuesto, más la perturbación provocada en el acto de medida en virtud del intercambio de energía que se produce de la interacción entre el sistema medido y el aparato de medición.

Fue la perturbación inevitable observada en el acto de medición cuántica uno de los aspectos que llevó a Heisenberg, Bohr, Born y otros a afirmar que el colapso de estado o de función de onda se produce sólo el instante en que se realiza la medición. Es la medida, la que define las propiedades de los sistemas cuánticos bajo esta perspectiva. Y fue esta observación la que llevó también a estos científicos a afirmar que el estudio del mundo atómico y subatómico debe limitarse a lo que es directamente mensurable, por fuera de lo cual cualquier aseveración carece de sentido. Según este grupo de científicos no hay forma de saber lo que ocurre entre dos medidas consecutivas: “Por supuesto que resulta tentador concluir que, entre dos observaciones, el electrón debe hallarse en algún lugar intermedio y que, en consecuencia, debe haber seguido, por más imposible que resulte de establecer, algún camino u órbita”⁶⁶. Pero independientemente de esta afirmación de Heisenberg, él y los otros científicos aludidos se resistieron tajantemente a aceptar que los sistemas cuánticos tengan propiedades bien definidas por fuera del acto de medición pues, para ellos, cualquier afirmación que transgreda los límites de la mensurabilidad resulta totalmente injustificada. Recordemos una vez más que uno de los principios básicos de la física clásica consiste en que se esté o no midiendo un sistema físico, tal sistema constituye un objeto que contiene unas propiedades, como posición y velocidad, de manera bien definida; su estado está bien definido independientemente de cualquier acto de observación. Pues bien, en la esfera cuántica, según Bohr, Heisenberg y Born las

⁶⁶ Citado por KUMAR, Manjit. Quantum: Einstein, Bohr, y el gran debate sobre la naturaleza de la realidad. Barcelona: Kairós S,A,, 2011. p. 317.

propiedades determinantes del estado de un sistema físico son el resultado de un experimento específico: “En ausencia de experimento destinado a medir su posición o su momento, no existe, en su opinión, electrón que posea una posición o un momento claramente definido. La determinación de la posición del electrón crea un electrón-con-una-posición, mientras que la determinación de su momento crea un electrón-con-un-momento”⁶⁷. Afirmaciones que tomadas al pie de la letra sugerirían la creación de la realidad subatómica a partir de la mente, un presupuesto idealista mediante el cual, si se aceptara que la realidad atómica constituye el nivel más ínfimo de todo lo existente, se llegaría a negar la existencia objetiva de la realidad entera por fuera de los procesos de medición. El subterfugio de ésta filosofía ha sido declarar que la ciencia debe limitarse a tomar del mundo cuántico únicamente lo que el formalismo proporciona.

Estas aseveraciones se vieron fortalecidas a la luz del principio de incertidumbre que impide obtener información precisa y simultánea con respecto a ciertos pares de propiedades conjugadas ya que, por ejemplo, la medición de la posición de un electrón implica automáticamente la perturbación y, por lo tanto, la incertidumbre de su momento, con lo que Heisenberg , Born y Bohr supusieron que estas propiedades sólo son adquiridas por un sistema cuántico mediante el acto en el que interaccionan el aparato de medición y el sistema medido. “Fue la imposibilidad de medir simultáneamente con absoluta precisión la posición y el momento del electrón lo que llevó a Heisenberg a afirmar que el electrón no posee valores precisos de posición y momento. Hablar como si los tuviera o decir que posee una trayectoria carece en su opinión de todo sentido. Y especular, del mismo modo, sobre la naturaleza de la realidad que yace más allá del reino de la observación y la medida era, para él, un empeño completamente absurdo”⁶⁸. De igual manera, ésta afección insuperable asociada al acto de medida que “crea” supuestamente los valores de las propiedades constitutivas del estado de un

⁶⁷ KUMAR. Op. cit., p. 317.

sistema cuántico sugiere a éstos científicos que las diferentes mediciones consecutivas de un mismo sistema están desconectadas por nexos causales puesto que se trata de variaciones discontinuas individuales provocadas por cada acto de medida realizado. Este último aspecto es uno de los presupuestos que llevan a Heisenberg y otros a negar el carácter determinista de los procesos cuánticos ya que según ellos, la investigación científica debe remitirse únicamente a lo que es susceptible de medición y, precisamente, lo que es susceptible de medición proporciona un conjunto de datos discontinuos, dispersos y sin conexión aparente entre sí, con lo cual bajo dicha perspectiva se asume que no tiene sentido hablar de nexos causales que permitan articular coherentemente los datos obtenidos en los distintos actos de medida sobre un mismo sistema en diferentes lapsos de tiempo.

Hay que resaltar el influjo de la filosofía de Ernst Mach en el pensamiento de Heisenberg y Bohr. Ernst Mach, fue un importante antecedente del positivismo lógico a cuyo pensamiento también Einstein se adhirió en su juventud sin tardar en abandonarlo a causa de que tal filosofía sugería la negación de la realidad objetiva, declarando que el problema de si la realidad es objetiva o subjetiva es una cuestión que carece de sentido por ser incontrastable experimentalmente. Mach proponía que “el contenido de la ciencia puede consistir sólo en lo siguiente: 1. Investigar las leyes de relación entre las representaciones (Sicología). 2. Descubrir las leyes de relación entre las sensaciones (Física). 3. Explicar las leyes de relación entre las sensaciones y las representaciones (sicofísica)”⁶⁹. Afirmaba que la ciencia y la filosofía deben despojarse de la metafísica y remitirse a lo directamente experimentable o mensurable. La filosofía de Mach consiste en un empirismo radical que limita el conocimiento a la sensación y reduce el mundo y los hechos a las asociaciones mentales entre las distintas sensaciones; a través de esta perspectiva, el filósofo se sumerge en dimensiones subjetivistas que le

⁶⁹ Citado por LENIN, V.I.: Materialismo y empiriocriticismo: notas críticas de una filosofía reaccionaria. México D.F.: Editorial Grijalbo, S.A., 1967. p. 27.

llevan a negar el valor cognoscitivo de categorías como causalidad, determinismo, realidad objetiva, suponiéndolas, por su carácter general y abstracto, nociones metafísicas obsoletas e inútiles, carentes de valor cognoscitivo y que deben ser eliminadas de la práctica científica para que esta pueda ir avanzando sobre la base de los datos puramente verificables en el experimento. Naturalmente tal filosofía se niega a la elaboración de un cuadro general del mundo en el cual el determinismo pueda ser un principio regulador del comportamiento de los procesos físicos. Se trata de una filosofía que limita el estudio de la realidad a la sensación negando el ejercicio especulativo racional y fundamentado por considerarlo carente de sentido y de valor científico. Esta visión antirrealista resultó encajar a la perfección con el presupuesto de Heisenberg y Bohr de que por fuera de los experimentos cuánticos, no se puede hablar de que los sistemas físicos ultra-microscópicos contengan propiedades conocidas o desconocidas; bajo la influencia de tal filosofía, es en la experimentación en la que los sistemas físicos crean dichas propiedades y nos proporcionan información fiable con lo que la ciencia física debe circunscribirse al análisis de los datos proporcionados por las sensaciones y no aventurarse a explicar la realidad que subyace más allá de la experiencia humana. Bohr resumió esto en una frase: “No existe un mundo cuántico. Lo único que existe es una descripción mecánico cuántica abstracta”⁷⁰ agregando más tarde que “es un error creer que la tarea de la física consiste en descubrir cómo es la naturaleza. La física se ocupa sólo de lo que podemos decir sobre la naturaleza”⁷¹ con lo cual queda sobreentendido que los únicos objetivos de la ciencia deben ser “ampliar el rango de nuestra experiencia y ordenarla”⁷².

El hecho de que la medición cuántica resulte interferir en el sistema medido perturbándolo considerablemente y la apreciación filosófica de Heisenberg y los científicos cercanos a su posición han alimentado interpretaciones subjetivistas más radicales sobre la mecánica cuántica, cuya influencia se extiende hasta

⁷⁰ Citado por KUMAR, Op. cit., p. 317.

⁷¹ *Ibíd.*, p. 348.

⁷² *Ibíd.*, p. 349.

nuestros días. En junio del 2015 apareció un artículo en la sección de ciencia de ABC, una publicación virtual española que contiene el título *“La realidad no existe hasta que la medimos, según investigadores australianos”*, en el que se defiende la idea de que la realidad objetiva no existe, al menos en su esfera ultra-microscópica, antes de ser partícipe de algún proceso de medición. Según tal posición que, por un lado carece de argumentación clara y pormenorizada y, por otro, se limita a realizar aseveraciones que considera definitivas, el mundo cuántico no existe en sí y de manera independiente de la conciencia humana pues es ésta la que decide crearlo mediante el acto de medición, algo similar al *ser es ser percibido* de Berkeley. La publicación se limita parafrasear las afirmaciones de Bohr y Heisenberg pero de una manera muy vaga, mostrándolas como una novedad insólita nunca antes considerada: Nuestra lógica parece decir que el objeto actúa tanto como onda o partícula en virtud su naturaleza y que nuestras mediciones no tendrán nada que decir sobre esto. Pero la teoría de la cuántica predice que el resultado dependerá de cómo el objeto sea medido al final de su recorrido. Y esa es exactamente la conclusión a la que un equipo de la Universidad Nacional de Australia ha llegado⁷³. El problema de las propiedades simultáneamente corpusculares y ondulatorias de la materia no es una cuestión privativa del acto de medición y que se decide mediante el mismo. Subsiste hasta hoy el debate acerca de la naturaleza de la realidad subatómica, en la que no existe aún una respuesta definitiva acerca de si los átomos, electrones, protones, quarks, mesones, bosones, etc. integran una realidad corpuscular, ondulatoria, simultáneamente corpuscular y ondulatoria, unas veces corpuscular y otras ondulatoria; o si se trata de una realidad sui generis en la que sus objetos constitutivos son singularmente únicos, cualitativamente diferentes a todos los objetos con que los sentidos humanos estamos acostumbrados a tratar.

Otros autores de artículos como el chino Shan Gao, no sólo adjudican un papel fundamental al acto de medición en el colapso de la función de onda sino que

⁷³ Aparece en: <http://www.abc.es/ciencia/20150602/abci-realidad-existe-201506021020.html>

introducen el papel de la conciencia, considerándola una propiedad inherente a todas las sustancias de la naturaleza y, además, una propiedad fundamental en el devenir de los procesos cuánticos desde la superposición de estados hasta estados definidos. Este autor, se basa en el hecho de que la conciencia humana es capaz de distinguir en el acto de medición tanto un estado correspondiente a una superposición de estados, como a cada uno de los estados diferenciados que, unidos, constituyen los estados cuánticos superpuestos. Si un sistema tiene un estado A equivalente a una superposición de estados a , b y c , la conciencia del observador será capaz de distinguir éste estado A y, además, sus estados constitutivos independientes a , b o c ; esto aplica a propiedades como el espín, el momento, las coordenadas, la energía, el tiempo y demás propiedades asociadas a los estados cuánticos. Shan Gao se basa en la controversia entre dos puntos de vista frente a la naturaleza de la conciencia: quienes suponen que la conciencia es una propiedad emergente del mundo que surge sólo en determinadas condiciones y quienes suponen que se trata de una propiedad fundamental y omnipresente en la realidad, acercándose a este segundo punto de vista. Esta posición se denomina *panpsiquismo* (pan: todo y, psyche: alma o conciencia) y sugiere que de alguna forma, toda sustancia en el mundo posee conciencia. El autor se basa además en una interpretación particular de la teoría de colapso objetivo o dinámico de GRW que brevemente se mencionó, sugiriendo que el devenir aleatorio de los procesos cuánticos adquiere un orden mediante la conciencia creadora del universo, que en este caso se concreta en el ser humano quien, es capaz de seguir, en conexión con el universo, la forma en cómo se transmutan los estados cuánticos en una forma armónica y en medio de la superposición. Se trata, pues de una interpretación idealista objetiva que atribuye a la conciencia una naturaleza universal. Según dicha interpretación el ser humano constituye una forma particular de la conciencia; una forma más elevada que otras sustancias de menor complejidad como el aparato de medición, incapaces de provocar el colapso de estado, dado que la concientización de los datos obtenidos en el proceso de medida es privativa de la mente humana. Todo en la naturaleza posee

conciencia pero en diferentes grados; sólo la conciencia humana es capaz, según Shan Gao, de proporcionar percepciones claras y definidas acerca de los estados superpuestos de la realidad cuántica y de sus estados constitutivos individuales y diferenciados. Shan Gao concluye que no se puede separar la cuestión de la transición de lo cuántico a lo clásico de la cuestión de si la conciencia es una propiedad emergente o fundamental de la naturaleza ya que toda sustancia en el mundo es partícipe de una conciencia, aunque sólo la forma humana de conciencia sea capaz de percibir y diferenciar los estados superpuestos de los sistemas cuánticos y los estados independientes constitutivos de esos estados superpuestos⁷⁴. Ésta perspectiva y otras afines poseen un tinte animista que se ha empleado deshonestamente para producir discursos sobre la física cuántica y la sociedad, el espíritu y hasta la superación personal. Deepak Chopra es uno de los ejemplos vivos de la más ramplona charlatanería que se soporta en las ambigüedades de las interpretaciones idealistas y subjetivistas para permitirse introducir sinsentidos como su bien vendido misticismo cuántico. Es decir, al no expresar de manera clara la forma cómo se puede afirmar que la conciencia, la observación, y la medición cumplen un papel en los procesos de interacción entre el ser humano y la realidad cuántica constituida en una permanente superposición de estados, las interpretaciones subjetivistas e idealistas abren la puerta a los más descabellados disparates, carentes de fundamento en la práctica científica pero aderezados con la terminología propia de esta ciencia.

La cuestión de decidir qué papel juegan los observadores y el acto de medición en los procesos investigativos de la física cuántica ha dado lugar a un debate filosófico entre realismo y antirrealismo puesto que, llegando a la médula de la cuestión se plantea el problema de si los sistemas cuánticos constituyen partículas que existen previa e independientemente de la observación o si se encuentran supeditados y dependen de la misma. La cuestión acerca del papel de los

⁷⁴ Revisar a GAO, Shan. A Quantum Physical Effect of Consciousness. Sydney: Unit for HPS & Centre for Time, SOPHI, University of Sydney, 2006.

observadores provocó un cambio en el desarrollo de la teoría de tal forma que se pasó de la discusión de los fundamentos matemáticos y formales a cuestiones relacionadas con la interpretación de la teoría en sus aspectos formales y experimentales: “para el final de la década de los años veinte e inicio de la década de los treinta, las preguntas acerca de los presupuestos metafísicos y los compromisos ontológicos de la teoría empezaron a jugar un papel tan importante en la consolidación del paradigma de la mecánica cuántica como el que las cuestiones acerca de su estructura matemática había jugado una década antes”⁷⁵. Juan Manuel Jaramillo realiza un análisis pormenorizado del problema del estatus ontológico de los objetos de estudio de la física cuántica a la luz de la tensión realismo-antirrealismo. “Mientras los realistas-en especial los llamados realistas científicos-aseveraron que los objetos del conocimiento científico existen con independencia de la mente y de los actos de los científicos y que las teorías son verdaderas de este mundo objetivo, los antirrealistas adoptaron un punto de vista escéptico con respecto a la existencia de dichas entidades y con relación a la verdad de las teorías que, presumiblemente, se ocupaban de dichas entidades”⁷⁶. Como hemos visto, las afirmaciones de Heisenberg y Bohr se acercan más a la segunda posición aunque, como veremos más adelante, aceptaran que la teoría cuántica es una teoría completa aunque no nos diga nada acerca del mundo más allá de la medición. Esto resulta importante por cuanto la aceptación o negación del estatus ontológico objetivo de los sistemas cuánticos es un aspecto que influye de manera decisiva en la cuestión de si se puede hablar o no de determinismo en los procesos cuánticos. Como se ha expuesto, la posición de Heisenberg y Bohr se niega a la posibilidad indagar acerca de los procesos que se esconden tras los datos experimentales proporcionados por el formalismo y la medida con lo que se niega a la posibilidad de descubrir un determinismo en los procesos cuánticos ya que, como hemos visto, lo único que proporciona la medición y el formalismo son

⁷⁵ CALA, Favio y ESLAVA, Gustavo. Mecánica cuántica, sobre su interpretación, historia y filosofía. Bogotá: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 2011. p. 15.

⁷⁶ JARAMILLO Uribe, Juan Manuel: ¿Es la ciencia una rama de la literatura fantástica?, pretexto para una reflexión sobre el realismo. Manizales: Universidad de Caldas, 2001. p.21.

datos discontinuos y dispersos que no constituyen un bloque orgánico de información que pueda ser correlacionada entre sí a través de nexos causales.

En todo caso, más allá de los abusos frente al tema del papel de la medición en la física cuántica, es ineludible el hecho de que, a diferencia de los sistemas clásicos, en los sistemas cuánticos la medición sí que altera los resultados de las mediciones. Sin embargo no está claro si tal alteración se produce en el sentido de que perturbe realmente los sistemas medidos o en el sentido de que sin ella sería imposible saber nada acerca de dichos sistemas. Las mediciones son algo así como los puentes que permiten hacer una correlación entre la lectura de los aparatos macroscópicos de medición, tales como los amperímetros y voltímetros, con los estados del sistema cuántico bajo observación. “Esto hace que la pregunta acerca del papel que desempeñan los observadores sea de suma importancia; después de todo, son los observadores quienes determinan cuáles de las variables del sistema serán medidas, quienes preparan los experimentos para lograr la relación adecuada entre las variables macroscópicas y las microscópicas y quienes evalúan e interpretan los resultados de las mediciones”⁷⁷. Como hemos visto, según algunos, sin la presencia de observadores no hay nada que se pueda afirmar con respecto al estado real de un sistema cuántico; especificar clara y definitivamente el estado de un sistema demanda la presencia de un observador que evidencie los resultados proporcionados por el aparato macroscópico de medida, presencia que, en la frontera entre lo clásico y lo cuántico parece generar una interferencia sobre el sistema cuántico del que se quiere tener información. Según otros, no existe la posibilidad de que los observadores causen una interferencia significativa sobre la evolución de los sistemas cuánticos bajo medición. Según esta perspectiva “las observaciones o mediciones son invasivas sólo en tanto que sin ellas nunca podríamos obtener evidencia alguna ni de la existencia ni del comportamiento de los estados que predice el formalismo de la teoría, afirmar que el estado de un sistema físico se ve alterado por la presencia

⁷⁷ CALA y ESLAVA. Op. cit., p. 13.

de observadores requiere hacer explícitas las alteraciones que serían introducidas por el acto de medición”⁷⁸. Esta cuestión rebasa el ámbito del formalismo de la física cuántica y requiere de otras herramientas de análisis como la epistemología puesto que “hay una clara diferencia entre un evento físico y nuestro acceso epistémico a este, una diferencia que quienes definen las mediciones en términos de la presencia o ausencia de observadores parecen olvidar”⁷⁹.

2.2.4. Consideraciones complementarias sobre la probabilidad en la física cuántica y la cuestión del determinismo.

Como se ha podido ver, la forma cómo proceden los sistemas cuánticos se presenta en una manera probabilista; un sistema cuántico no sigue nunca un solo *camino*, contiene un conjunto de posibilidades reales hacia las cuales desplegarse en el transcurso de su evolución temporal, cada una de esas posibilidades se encuentra, a su vez, asociada a un determinado valor de probabilidad. “En general, un estado puro sólo determina un conjunto de propiedades posibles, acompañadas por un cierto valor de probabilidad. En general, una partícula cuántica no es localizable en una región precisa del espacio. Pero podría estar aquí, allí, en cualquier parte...Y cada <<podría>> va acompañado por un preciso valor de probabilidad”⁸⁰. En determinados instantes, los sistemas cuánticos se encuentran en superposición de estados, albergando una probabilidad asociada a cada posible estado en el cual devenir; y por otro lado, en otros determinados instantes, cuando se producen los colapsos de estado, éstos suceden de manera aleatoria, decidiéndose hacia uno de los estados previamente distribuido entre un rango definido de probabilidades. En cualquier caso, el desenvolvimiento de los procesos cuánticos acaece con base en un carácter estadístico; no existe un desarrollo unívoco; la regularidad al interior de los micro-procesos no se presenta en la misma forma que en los macro-procesos.

⁷⁸ Ibid., p. 14.

⁷⁹ Ibid., p. 14.

⁸⁰ DALLA y FRANCIA. Op cit., p. 143.

Recordemos que a la luz del determinismo laplaceano que se había sostenido sobre la base de los triunfos de la física clásica, el carácter probable en el comportamiento de los procesos físicos se había considerado como un síntoma de limitación epistémica o gnoseológica: lo probable era lo incierto, aquello que el intelecto humano es incapaz de determinar con exactitud debido a la imperfección de sus cálculos, mediciones, o a la falta de instrumentos adecuados para acceder a los objetos de estudio. En principio, esta insuficiencia de nuestras capacidades de acceso epistémico se consideraba totalmente perfectible. En la mecánica cuántica pareciera que lo probabilístico se constituye como un rasgo inherente a la realidad objetiva; en el mundo subatómico, el tránsito de unos estados a otros al interior de los procesos cuánticos, no se encuentra determinado unívocamente sino multívocamente, aunque esa determinación resulte siempre bien definida; un estado cuántico puede transformarse en varios estados probables, pero no en cualquiera, puesto que tiene un rango bien definido de probabilidades asociadas a sus estados superpuestos.

Uno de los rasgos de la física clásica que fortaleció la elaboración de un cuadro determinista y mecanicista del mundo fue su potencial predictivo. Con los aparatos formales que a partir de Newton se desarrollaron, se abrieron grandes posibilidades para estudiar cuantitativamente los sistemas físicos y prever con enorme precisión y certeza la manera cómo se comportan en el transcurso de su evolución temporal. Bastaba con tener noticia de las condiciones en que se encuentra un sistema físico y las fuerzas que actúan sobre él para especificar unívocamente la manera en cómo se comportará en el futuro. Esto sugería, en el marco del determinismo mecanicista de la física clásica, que la causalidad en el mundo se encuentra unívocamente determinada y que no había lugar para la desviación en la regularidad de los procesos de la naturaleza. Como las predicciones con respecto a procesos similares daban como resultado valores siempre similares, se asumía que la naturaleza procedía siempre regularmente. En la física cuántica, la predicción resulta estar inevitablemente impregnada de un

carácter probabilístico, de tal forma que no resulta posible decidir con certeza, como se ha mostrado, la forma en cómo se comportaran los sistemas cuánticos bajo estudio. Hemos visto cómo el carácter relativamente incierto de las predicciones en los experimentos cuánticos ha sugerido a algunos, como Heisenberg y Born, la idea de que en la mecánica cuántica resulta inevitable el abandono del determinismo y la causalidad, considerándolas categorías incompatibles con el carácter probabilístico de las predicciones.

Así, la cuestión de asignar un significado a la probabilidad en la mecánica cuántica se vuelve problemática, surgiendo puntos de vista que consideran la conveniencia de asignar un carácter bien sea epistémico-gnoseológico o bien un carácter ontológico a las probabilidades. Éstas “son gnoseológicas si representan la falta de conocimiento que tenemos del sistema. En esta interpretación los observables del sistema asumen un valor preciso, definido con exactitud, pero la teoría no es completa y no puede calcular dicho valor. Lo más que puede hacer es dar una probabilidad para las propiedades, siendo aquella una manifestación de nuestra ignorancia del sistema”⁸¹; esta interpretación, como se ha mencionado, se ve sintetizada en la paradigmática visión de Laplace. En cambio, “En la interpretación ontológica, la distribución de los valores que toma un observable es manifestación de una indefinición objetiva del observable en los sistemas. Todos los sistemas son idénticos y el estado es el mismo en todos, pero ciertos observables asumen valores difusos por una indefinición esencial, ontológica, en ciertos estados del sistema”⁸², con lo cual habría que precisar cuáles son las implicaciones filosóficas que se plantean si se asume esta última postura para la cuestión del determinismo. La solución a este dilema, como se mostrará pronto, ocupará un lugar central dentro del debate interpretativo alrededor de la física cuántica, especialmente en la controversia entre Bohr, Heisenberg, la Escuela de Copenhague y Einstein.

⁸¹ TORRE. Op. cit., p. 68.

⁸² *Ibíd.*, p. 69.

La superposición de estados, el comportamiento corpuscular-ondulatorio de los objetos cuánticos, las relaciones de incertidumbre de Heisenberg, la regla de Bohr y el colapso de estado han puesto en problemas al determinismo laplaceano. El mecanicismo inherente a tal cuadro general del mundo parece resultar insostenible a la luz de los descubrimientos que trajo la física cuántica; a la luz de éstos, el determinismo laplaceano resulta una imagen del mundo demasiado rígida, en la que se excluye todo rasgo contingente en la naturaleza de las cosas y se le atribuye una determinación prescrita e incambiable, que sostenida a ultranza, negaría la posibilidad del surgimiento de novedades en el devenir de los procesos físicos. El determinismo es una imagen acerca de cómo está constituido el mundo, se cuestiona si el estado presente de las cosas está ligado con sus estados pasados y futuros por medio de determinados nexos de regularidad, y si dicha regularidad es unívoca y absoluta describiendo un patrón necesario e inevitable o si cabe en dicha imagen la contingencia y el surgimiento de fenómenos fortuitos y novedades objetivas. El determinismo clásico rechaza eventos contingentes y la aparición de procesos casuales, y al afirmar la inevitabilidad en los nexos causales que constituyen la trama del mundo físico, sugiere la idea de una historia preestablecida de manera incambiable en los procesos, con lo cual, el advenimiento de todo lo que sucede en el mundo resultaría inevitable. Sin embargo, la introducción de la probabilidad ha planteado la necesidad de revisar si con ello se resquebraja totalmente la posibilidad de desarrollar una imagen determinista del mundo físico como sugieren Heisenberg y Bohr, o si se plantea la necesidad de abandonar esa imagen rígida del determinismo laplaceano, surgida en otro estadio del desarrollo de la ciencia, para asumir el reto de elaborar una nueva noción de determinismo, libre de las limitaciones del determinismo planteado en términos laplaceanos. En el fondo de esto subyace el problema de si existe incompatibilidad entre una imagen causal determinista y el carácter probabilístico del comportamiento de los sistemas cuánticos; de si tanto causalidad como casualidad, lo necesario y lo contingente, constituyen rasgos simultáneos e interrelacionados de la realidad, o si los mismos son excluyentes e

irreconciliables. En el siguiente capítulo se cerrará con un análisis del problema del determinismo a la luz de las diferentes interpretaciones de la mecánica cuántica tratando de esclarecer cuáles son las vías alternativas más prometedoras para contribuir a la solución de éste problema.

Capítulo 3

El problema del determinismo en las diferentes interpretaciones de la mecánica cuántica y sus alternativas de solución

Se ha llegado a un punto en el cual la cuestión del determinismo se ha vuelto agudamente problemática. Los procesos cuánticos constituyen un nivel de la realidad que proporciona una imagen radicalmente nueva del mundo físico con respecto a la que proporcionaba la física clásica. Tal vez sea la cuestión del determinismo o su negación la que sintetice los aspectos esenciales del debate interpretativo que se suscitó una vez consolidado su aparato matemático formal. Bohr, Born, Heisenberg desarrollaron una interpretación que descarta la posibilidad de hablar de determinismo en la física cuántica; ésta interpretación, a la que varios científicos se fueron adhiriendo y que por ello se vino a convertir en la interpretación estándar u ortodoxa es conocida con el nombre de *interpretación de Copenhague*, haciendo alusión al lugar en donde se estableció el instituto de investigación física Niels Bohr, además de ser el lugar de nacimiento del gran científico danés. Más tarde tal interpretación recibiría fuertes críticas por parte de Albert Einstein y otros pocos científicos que se adhirieron a su visión de *variables ocultas*, una propuesta que no recibió demasiada atención pero que resulta imposible pasar por alto para analizar la controversia en torno al determinismo. Posteriormente al debate interpretativo entre Copenhague-Einstein, se siguieron planteando otras alternativas y aún en nuestros días la cuestión resulta bastante problemática. En lo que sigue del presente trabajo, se mostrará un esquema de las diferentes interpretaciones que al respecto se han ido elaborando procurando plantear, a manera de conclusión, cuál sería una posible vía hacia la resolución de este problema.

2.3.1. La interpretación de Copenhague y el problema del determinismo

Como se dijo, la interpretación de Copenhague es la interpretación que desarrollaron Niels Bohr, Werner Heisenberg, Max Born y otros. Ésta se fue consolidando con el tiempo como la interpretación ortodoxa o estándar, dada su amplísima aceptación entre la comunidad científica. Sus presupuestos se han ido ya insinuando a lo largo de los apartados precedentes en la medida en que se han expuesto las consideraciones que Bohr, Heisenberg, Born y otros han planteado con respecto a los desconcertantes descubrimientos de la física cuántica. La elaboración de tal interpretación se dio sobre la base del presupuesto de que el estudio de los sistemas cuánticos y la ciencia en general, deben restringirse a la mensurabilidad de las propiedades de los sistemas físicos, desechando la transgresión teórica que vaya más allá de la evidencia empírica. Como se ha mostrado, aquello que es directamente accesible a la experiencia humana, en la física cuántica, aparece de un modo difuso, con lo cual, para la interpretación de Copenhague, resulta muy complicado elaborar una imagen general del mundo en la cual conceptos de gran amplitud como el de determinismo puedan tener algo de relevancia.

La interpretación de Copenhague concentró sus esfuerzos en mostrar que la física cuántica constituye una teoría correcta y completa, en el sentido de que dice todo lo que es posible decir sobre los sistemas cuánticos, cerrándose a la posibilidad de desarrollos significativos ulteriores. Así, según esta interpretación, también la física clásica constituye una teoría completa ya que es perfectamente legítima para explicar los procesos físicos macroscópicos a los cuales se circunscribe. Nada tiene que decir un marco teórico acerca de los procesos físicos que explica el otro, la acción investigativa de cada uno se encuentra delimitada por su propio campo de estudio. Resumiendo los presupuestos que sirven como principios rectores de ésta interpretación ortodoxa tenemos que:

- a) En primera instancia, la interpretación de Copenhague descansa sobre el principio de Von Neumann. Éste principio postula que por cada uno de los estados dinámicos de cualquier sistema cuántico debe existir una probabilidad bien definida correspondiente que representa, a su vez, la posibilidad de encontrar al sistema micro-físico en tal estado. Vale la pena resaltar que tal correspondencia entre el estado propio y el valor propio no constituye una correspondencia precisa sino que, por el contrario, instituye un límite entre el estado real en el que se encuentra el sistema cuántico y la precisión de la información que constituye el conocimiento que podemos obtener con respecto a dicho estado en que se encuentra el sistema.
- b) En segunda instancia, en la Interpretación de Copenhague se asume como definitivo el principio o relaciones de incertidumbre de Heisenberg, sosteniendo que tal principio constituye una máxima insoslayable de la naturaleza de los sistema cuánticos, con lo que se marca un límite insuperable para la precisión con la que es posible conocer ciertos pares de propiedades determinantes del estado de los sistemas cuánticos. Así, según la interpretación de Copenhague, el principio de incertidumbre formalizaría esa indeterminación insalvable que se produce como resultado de cualquier acto de medición que, según los adeptos de tal interpretación, es un factor que introduce una perturbación que resquebraja cualquier intento por concebir deterministamente los procesos atómicos y subatómicos. Para la interpretación de Copenhague, el principio de Heisenberg demuestra que cuando se lleva a cabo un proceso de medición sobre una propiedad, a causa de la correlación inseparable de ciertos pares de variables conjugadas, se provoca una perturbación ineludible de la otra, con lo cual la precisión obtenida en los resultados de una de las variables, repercutirá en una imprecisión en los resultados de la otra, imprecisión proporcional a la precisión de la primera. Para Copenhague, éste principio demuestra que los sistemas mecánico-cuánticos son sistemas inherentemente indeterminísticos ya que si no es posible establecer las

propiedades determinantes del estado presente de un sistema cuántico, mucho menos lo será establecer las propiedades determinantes del estado futuro del mismo.

- c) En tercera instancia, la interpretación de Copenhague, sobre todo debido a Bohr, establece el *principio de complementariedad* como un postulado básico para sostener su interpretación. El principio de complementariedad resalta el supuesto indeterminismo de la mecánica cuántica, sugiriendo que para comprender la naturaleza de los sistemas cuánticos hay que reconocer la limitación inherente a los conceptos que se utilizan para describir el comportamiento de los sistemas cuánticos, ya que estos dependen de las propiedades observables en los sistemas, definidas en buena medida por los instrumentos con los cuales interactúan en los procesos de medición, agregando que los resultados de las mediciones no constituyen secuencias coherentes que puedan ser correlacionadas a través de una línea causal que sirva como hilo conductor. Como se ha hecho notar, la discontinuidad aparece como un rasgo inherente a los sistemas cuánticos, algo contrario a los sistemas que estudia la física clásica; así mismo, en estos últimos resultaba evidente la coordinación causal, algo que ya no resulta tan patente en los sistemas cuánticos; también la interacción entre objeto estudiado y aparatos de medición constituye una situación que difiere radicalmente entre sistemas cuánticos y sistemas clásicos, provocándose en el primer caso una perturbación significativa en su estado, algo que no sucede con los sistemas clásicos; igualmente, la determinación precisa y simultánea de ciertos pares de propiedades como la posición y el momento difiere cuando se comparan los sistemas clásicos con los cuánticos, siendo en el primer caso, como se ha mostrado, perfectamente posible dicha determinación precisa y simultánea e, imposible en el segundo caso, debido a las relaciones de incertidumbre de Heisenberg; por otro lado, en los sistemas clásicos, ondas y partículas constituyen entidades físicas bien diferenciadas y de naturaleza

incompatible, algo que no aplica a los sistemas cuánticos, los cuales describen propiedades tanto ondulatorias como corpusculares. Para solventar éstas contradicciones que se suscitan en el tránsito de lo clásico a lo cuántico o viceversa, Bohr planteó el principio de complementariedad, arguyendo que los niveles macro y micro de la realidad física constituyen dominios complementarios, existiendo una línea divisoria entre el mundo clásico y el cuántico, de tal forma que en cada dominio deben aplicarse términos circunscritos únicamente a su campo de aplicación. Cualquier esfuerzo por formular una visión del mundo físico que integre los niveles macro y micro debe reconocer la existencia de esa línea divisoria que estipule la necesidad de explicar cada campo de dominio en sus propios términos que son complementarios pero excluyentes e incompatibles entre sí. Así, con respecto a la causalidad y el determinismo, se trataría de nociones legítimas para los procesos físicos que estudia la física clásica, pero resultan inadecuados para el estudio de los procesos físico-cuánticos.

Así, sobre la base de éstos principios se erigió la interpretación de Copenhague que considera una absoluta incompatibilidad entre la naturaleza del comportamiento de los sistemas macroscópicos y la de los sistemas ultramicroscópicos. Sugirió Bohr que “La teoría cuántica se caracteriza por el reconocimiento de una limitación fundamental en las ideas físicas clásicas cuando se aplican a los fenómenos atómicos”⁸³, con lo que se refería a que la física debe renunciar a la posibilidad de concebir una teoría unificada que integre coherentemente y relacione de manera adecuada las leyes que rigen en el mundo macroscópico con las leyes que rigen el mundo microscópico. Como se había dicho, a la luz de ésta perspectiva, tanto la mecánica clásica como la mecánica cuántica resultan ser teorías completas puesto que dan razón satisfactoria de los ámbitos físicos que estudian, dicen todo lo que pueden decir acerca de los procesos físicos que investigan, lo cual implica desistir a los intentos de que

⁸³ Citado CALA y ESLAVA. Op. cit., p. 17.

algunas nociones, como la causalidad y el determinismo, puedan ser aplicables al estudio de ambos dominios físicos. Bohr dijo lo siguiente:

La naturaleza misma de la teoría cuántica nos fuerza a considerar la coordinación espacio-temporal y a la afirmación de causalidad, la unión de los cuales caracteriza a las teorías clásicas, como características complementarias pero excluyentes de la descripción, y que simbolizan la idealización, la observación y la definición, respectivamente. De la misma forma en que la teoría de la relatividad nos ha enseñado que la conveniencia de distinguir entre espacio y tiempo descansa solamente en la pequeñez de las velocidades ordinarias cuando se las compara con la velocidad de la luz, aprendemos de la teoría cuántica que la adecuación de nuestra descripción espacio-temporal causal corriente depende enteramente del pequeño valor del cuanto de acción cuando se le compara con las acciones involucradas en las percepciones sensibles ordinarias⁸⁴.

Bohr agrega que debido al postulado cuántico de la discontinuidad, que resulta totalmente extraño a las teorías clásicas, en la física cuántica hablar de determinismo resulta imposible ya que dicho postulado “implica una renuncia frente a la coordinación espacio-temporal causal de los procesos atómicos. De hecho, nuestra descripción causal de los fenómenos se basa enteramente en la idea de que los fenómenos objeto de estudio pueden ser observados sin ser perturbados apreciablemente”⁸⁵. De hecho, y como se ha reiterado ya, para Bohr, Heisenberg y los demás científicos que se adhirieron a la interpretación de Copenhague, resulta fundamental reconocer que los procesos de medición cumplen un papel fundamental dentro de la física cuántica, no sólo en el sentido de que sin ellos no podamos tener un acceso epistémico a los sistemas micro-físicos, sino en el sentido de que a través de ellos la misma realidad cuántica adquiere sentido, así sea un tanto difuso. Recordemos que para los científicos aludidos, nada se puede decir del mundo cuántico por fuera de los procesos de medición; carece de sentido

⁸⁴ Ibid., p.18.

⁸⁵ Ibid., p. 17.

intentar explicar lo que sucede en los procesos cuánticos más allá de los datos que el experimento pueda proporcionar; hablar de la existencia de propiedades de los sistemas cuánticos sólo adquiere validez en el momento en que un aparato de medida proporciona valores específicos, por fuera de ello no se puede decir que, por ejemplo, un electrón posea propiedades con valores específicos, así sean desconocidos; en la interpretación de Copenhague como bien lo ha señalado Antonio Aparicio: "...no tiene sentido hablar de propiedades objetivamente poseídas por un sistema cuántico a menos que se realice una observación sobre él. En otras palabras, una propiedad de una partícula, como es su posición, sólo tiene sentido cuando se realiza una medida de la partícula con un aparato diseñado para detectar su posición. Es decir, la posición es algo que sólo existe en el contexto del aparato y del observador que lo utiliza; no en el contexto de la partícula"⁸⁶. El problema de la medición cuántica ocupa un lugar central en la interpretación de Copenhague, y debido a la exacerbada importancia atribuida al observador, se comienzan a filtrar perspectivas indeterministas en la física cuántica, puesto que los resultados de la medición constituyen fragmentos discontinuos de información que no pueden ser coherentemente articulados a través de líneas causales ya que, por cada medida consecutiva que se realice sobre un mismo sistema, se produce una perturbación que impide unificar como un todo coherente cada estado medido con sus estados anteriores y posteriores. Esto debido a que según la interpretación ortodoxa, "una de sus consecuencias es que no cabe ni siquiera hablar de cómo es un sistema físico entre medidas, puesto que cualquier respuesta a preguntas de éste tipo sólo puede darse en el contexto de una medida"⁸⁷. Así, sobre la base de las sugerencias de Bohr, Heisenberg y sus copartidarios, "el problema de la medición no es un problema científico como otros...el problema de la medición muestra los límites últimos del proyecto científico mismo. Proclamaron entonces que hacer ciencia dependerá, a partir del desarrollo de la mecánica cuántica, de pintar una línea entre lo observado y el

⁸⁶ JUAN, Antonio Aparicio. La teoría cuántica y sus interpretaciones: un enfoque filosófico realista. Madrid: Revista Laguna, No. 13. 2003, p. 52.

⁸⁷ *Ibíd.*, p. 52.

observador, y que la ciencia debe limitarse a describir lo que se observa”⁸⁸, no aventurarse a erigir representaciones realistas de lo que es observado.

De acuerdo con la interpretación de Copenhague, una característica fundamental de los sistemas físico-cuánticos es su permanente superposición de estados, la cual se puede representar a través de una función de onda que es a su vez una combinación de las funciones de onda correspondientes a los diversos estados superpuestos. Así mismo, cada estado superpuesto puede ser representado por un vector que es la combinación de los diferentes vectores de estado que corresponden a los diferentes estados superpuestos hacia los cuales el sistema se puede desplegar en el transcurso de su comportamiento dinámico. De ésta manera, según la interpretación de Copenhague, los estados cuánticos constituyen, como Leonardo Vanni⁸⁹ ha sugerido, catálogos probabilísticos de diversas disposiciones que, en virtud de la regla de Born, ostentan un carácter difuso hasta el momento en que se realiza una medición, momento en el que se produce el colapso que transforma lo posible en lo real. Recordemos que Born, había sugerido que la función de onda de Schrödinger no se refiere a un sistema real sino que se refiere a una representación abstracta que a su vez simboliza un resultado estadístico de la interacción entre varios sistemas cuánticos que, en razón del postulado del colapso evolucionan azarosamente. De esta manera, aunque cada estado cuántico corresponde a una superposición de estados posibles, ésta situación se resuelve mediante el colapso o proyección que se suscita al medir. En otras palabras, para la interpretación de Copenhague, durante el proceso de medición, un sistema cuántico adopta de manera aleatoria uno de los resultados previamente potenciales a través de una evolución indeterminista; la interacción entre el sistema y el observador produce el colapso de la función de onda de modo que la superposición se resuelve por un único resultado. Resáltese

⁸⁸ OKON, Elías. El problema de la medición en mecánica cuántica. Coyoacán: México D.F., Instituto de Investigaciones Filosóficas de la Universidad Nacional Autónoma de México, 2014. p. 3.

⁸⁹ Revisar el artículo de VANNI, Leonardo: Historias en mecánica cuántica del 2015, en el que se profundiza en el estudio de la noción de “estado” en el contexto de la física cuántica.

que nada se puede decir acerca de los sistemas cuánticos antes de que se les induzca al colapso ya que ningún fenómeno es un fenómeno hasta que es un fenómeno observado; y, por otra parte, el fenómeno observado no corresponde a una imagen clara que pueda tener correlato con los resultados previos y posteriores de las observaciones, con lo cual, a la luz de la interpretación de Copenhague, la posibilidad de desarrollar una imagen coherente, causal del desenvolvimiento dinámico de los sistemas cuánticos se ve frustrada en pro de otra consistente en un agregado de datos dispersos que, si bien nos proporcionan información valiosa, sólo nos permiten circunscribir nuestras aspiraciones de conocer los sistemas cuánticos a un acercamiento utilitarista que nos permite realizar predicciones probabilistas pero que no permite representarnos el mundo que subyace tras esos datos que resultan inconexos entre sí.

De esta manera, sintetizando lo sostenido por la interpretación de Copenhague frente al problema del determinismo en la mecánica cuántica, tenemos lo siguiente. Ésta interpretación sostiene que los observadores y los procesos de medición cumplen un papel decisivo en su interacción con los sistemas cuánticos, produciendo en dicha interacción una perturbación bastante significativa sobre los resultados obtenidos, de modo que los diferentes colapsos de estado provocados, proporcionan datos sucesivos sin una conexión coherente entre unos y otros; esto se conecta con el presupuesto filosófico y metodológico de la interpretación de Copenhague de que la mecánica cuántica debe limitarse a examinar los datos empíricos sin pretender ir más allá de los mismos en vanos e ingenuos intentos de elaborar una imagen de conjunto de la realidad objetiva que subyace a la experimentación; con esto, si el científico debe circunscribirse a lo observado, y lo observado son datos dispersos sin aparente conexión entre sí, resulta, para la interpretación de Copenhague, inútil en principio esclarecer los nexos causales existentes entre unos y otros resultados obtenidos con lo que resulta insostenible afirmar que en los procesos atómicos y subatómicos pueda presentarse un comportamiento dinámico determinista.

Ahora bien, a la luz del principio de Von Neumann y de la regla de Born, la interpretación de Copenhague considera que los procesos cuánticos describen una dinámica puramente probabilística que excluye la posibilidad de un devenir determinista de los mismos. Esto quiere decir, que según tal principio y tal regla, los sistemas cuánticos proceden aleatoriamente sin describir ningún patrón de regularidad que pueda estipular un orden subyacente que se manifieste de manera estadística. Así, mientras que los sistemas que estudia la física clásica proceden de una manera regular, continua y unívocamente determinada, los sistemas cuánticos proceden de una manera contingente y multívoca; un sistema cuántico con las mismas características puede proceder unas veces de una manera y otras veces de otra, sin que exista una regla más o menos estable que rijan su desenvolvimiento mecánico. Según la interpretación de Copenhague, el estado en que se encuentra un sistema cuántico no condiciona unívocamente su desenvolvimiento futuro, sino que encierra en sí mismo un conjunto de posibilidades hacia las cuales desplegarse en su transcurso dinámico, estando cada una de esas posibilidades asociada a una probabilidad específica de ocurrencia. Recordemos que en la física clásica era común considerar la probabilidad como un síntoma de inconsistencia epistémica, siendo en la física cuántica un rasgo inherente a los sistemas micro-físicos que se concreta en el principio de superposición de estados mediante el cual, todos los sistemas cuánticos están caracterizados por estados difusos o indefinidos que constituyen varias posibilidades simultáneas que se resuelven aleatoriamente sin seguir nunca un curso estrictamente regular. Recordemos que para la interpretación de Copenhague, la salida abrupta a la superposición de estados se resuelve de manera aleatoria y es producida por el acto de medición, proceso mediante el cual, el intercambio de energía entre el aparato de medida y el sistema cuántico estudiado, sufre una perturbación inevitable. En este contexto, la interpretación de Copenhague, determinismo y probabilidad resultan ser dos categorías y dos propiedades de la realidad excluyentes, incompatibles e irreconciliables; el

determinismo excluye la existencia de la probabilidad, y la probabilidad excluye la posibilidad de la existencia del determinismo.

Por su parte, para la interpretación de Copenhague el determinismo también se resquebraja en los micro-procesos que estudia la física cuántica a la luz del principio o relaciones de incertidumbre de Heisenberg. Según este principio, como se ha visto, en los objetos ultramicroscópicos no existen estados que presenten coordenadas y momentos correspondientes que tengan, simultáneamente, un valor estrictamente determinado. De esto se sigue que, como el estado presente de los sistemas cuánticos no se encuentra rigurosamente definido, por lo tanto no se puede afirmar tampoco cómo se pueda encontrar definido el estado futuro del mismo en correspondencia con el estado previo. Recordemos que uno de los rasgos del determinismo es que los estados sucesivos de un sistema se encuentran coherentemente interconectados de modo que, un estado presente se encuentra determinado de manera causal con su estado previo y, a su vez, resulta ser determinante de su estado ulterior. Ahora, según la física cuántica, no es posible encontrar un estado presente cuyas propiedades se encuentren bien definidas con lo que se esfuma la posibilidad de encontrar los nexos causales que le conectan coherentemente con sus estados anterior y posterior. Ahora, según la interpretación de Copenhague, éste no es un rasgo que denote las dificultades para conocer con precisión ciertos pares de propiedades determinantes del estado de un sistema físico, sino que se trata de una limitación definitiva e inherente a los procesos micro-físicos, con lo cual resulta insuperable para la elaboración de una imagen determinista de dichos procesos. Por la interpretación de Copenhague, el principio de Heisenberg estipula una indefinición esencial de los procesos cuánticos, con lo cual se proscribe la posibilidad de que los sistemas cuánticos puedan describir un transcurrir dinámico en el que exista una coherencia orgánica entre los sucesivos estados por los cuales atraviesa. Si no existen estados que encierren unas propiedades claramente definidas tampoco puede existir un proceder en el que se vean contenidos, así sea implícitamente ciertos patrones de

regularidad que articulen un orden determinista en el transcurrir temporal de los procesos cuánticos.

Por último, el principio de complementariedad circunscribe el transcurrir causal y, por lo tanto, determinista a los procesos que estudia la física clásica agregando que, por otro lado, en la esfera mecánico-cuántica tales características están ausentes. Según este principio, la física cuántica comprende un dominio teórico completo y complementario del dominio de la física clásica. Cada marco teórico es válido en la esfera de la realidad que le corresponde y nada tiene que decir con respecto al otro. Así, mientras que en la física clásica, es perfectamente legítimo hablar de causalidad y determinismo, en la física cuántica no, puesto que debido a la discontinuidad inherente a los procesos ultramicroscópicos se hace imposible sostener un orden causal que articule regularmente dichos procesos. Este principio, fue sostenido por la Interpretación de Copenhague para solucionar las paradojas suscitadas al comparar el comportamiento de los sistemas de la física clásica con el de los sistemas de la física cuántica. Tal principio traza una barrera divisoria entre los dos ámbitos de la realidad que si bien son complementarios son igualmente incompatibles. En realidad, la interpretación de Copenhague nunca esclareció el punto específico en el que un sistema deja de ser clásico y comienza a obedecer a las leyes de la física clásica, sin embargo ha servido como una hipótesis ad hoc para sostener el indeterminismo cuántico como una característica definitiva de los sistemas ultramicroscópicos y, por su misma naturaleza, se ha cerrado a las posibilidades de buscar explicaciones alternativas al problema de las diferencias radicales que existen entre los sistemas que estudia la física clásica y aquellos que son estudiados por la física cuántica.

Éstos son los presupuestos que han servido a la interpretación de Copenhague para sostener el indeterminismo en la física cuántica o al menos para alegar cierto absurdo en la creencia de que es posible encontrar algún tipo de determinismo en los procesos ultramicroscópicos. En seguida se examinarán las objeciones que se

le han hecho a ésta interpretación que, como se ha dicho, se fue constituyendo con el tiempo, como la interpretación estándar u ortodoxa. Hay que decir que la física cuántica es una teoría muy exitosa, pero que una cosa son los resultados prácticos que su formalismo pueda proporcionar y otra las interpretaciones que se puedan realizar con respecto a dicho formalismo y con base en dichos resultados. La interpretación de Copenhague se basa en un formalismo que, aunque de carácter probabilista, ha permitido unos resultados sorprendentes que han repercutido en aplicaciones prácticas significativas. Por lo tanto, cualquier interpretación alternativa deberá acoger los principios formales que le permitan tener el mismo éxito que la mecánica cuántica estándar pero que, a su vez, se encaminen a solucionar los nudos interpretativos de una manera más exitosa.

2.3.2. Einstein, Podolsky y Rosen: primeras objeciones a la interpretación de Copenhague

Albert Einstein, quien realizó importantísimas contribuciones que posibilitaron el surgimiento de la mecánica cuántica a comienzos del siglo XX, mostró su inconformidad frente a los presupuestos que sustentaban la interpretación de Copenhague. Para Einstein, sin duda, la física cuántica constituía un enorme triunfo de la ciencia moderna; su aparato formal y las posibilidades investigativas prácticas que de él se derivaban resultaban evidentes para éste científico. Sin embargo, considerando una diferenciación entre el contenido de la ciencia y su significado filosófico, advirtió ciertas inconsistencias interpretativas en la versión de Copenhague que le resultaron inaceptables. De esta manera, aceptando por un lado los éxitos de la física cuántica, desarrolló una crítica contundente contra la interpretación que Bohr, Heisenberg, Born y otros habían elaborado, dirigiendo ése ataque al menos en cuatro flancos diferentes pero interrelacionados: primero, criticó la noción de realidad física que se encontraba implícita en la interpretación de Copenhague y al papel del observador que esta le atribuía en los experimentos; segundo, se opuso a la idea de que la física cuántica constituye una

teoría completa; tercero, rechazó el supuesto carácter puramente probabilístico que Copenhague le atribuía a la física cuántica; y, cuarto, agregó que la interpretación de Copenhague sugería la posibilidad de acciones no-locales, es decir, de interacciones instantáneas a distancia entre dos cuerpos constitutivos de un sistema físico, algo que se encontraba en contravía de la teoría especial de la relatividad, en la que queda estipulado la imposibilidad de que una interacción física pueda transgredir la velocidad máxima de la luz. Einstein adelantó ésta crítica contra la interpretación de Copenhague junto a dos científicos más, Boris Podolsky y Nathan Rosen; tal crítica llegó a constituirse como un momento esencial para conocer la naturaleza del debate interpretativo en torno a la física cuántica en general y en torno al problema del determinismo en particular.

En primera instancia, para Einstein, Podolsky y Rosen (o, simplemente, EPR, por sus iniciales), la interpretación de Copenhague sugiere una noción errónea de realidad física puesto que hace depender esta última del acto de observación. Para EPR, la realidad cuántica posee un estatus ontológico objetivo, existe por fuera e independientemente de la conciencia humana y, por lo tanto, de cualquier acto de observación o medición. Recordemos que, según la interpretación de Copenhague, no tiene sentido hablar de la realidad física de las entidades cuánticas más allá de la experiencia que de ellas se pueda tener; para la interpretación de Copenhague, las partículas subatómicas no poseen propiedades objetivas definidas como la posición, el momento o la energía a menos que se realice sobre ellas una medición. La interpretación de Copenhague sugería que antes y después de las interacciones entre los sistemas físicos y los aparatos de medición, los observables carecen de valores determinados. Ya Bohr había afirmado que “no existe un mundo cuántico. Lo único que existe es una descripción mecánico-cuántica abstracta”⁹⁰. En contra de esto, Einstein, Podolsky y Rosen consideran que las variables dinámicas de los sistemas físicos poseen

⁹⁰ Citado por KUMAR, Manjit: Quantum: Einstein, Bohr, y el gran debate sobre la naturaleza de la realidad. Barcelona, Kairós S.A., 2011. p. 335.

valores específicos que son tan reales para los sistemas que estudia la física cuántica como para los sistemas que estudia la física clásica y que, la mera posibilidad de medir el valor para una variable determinante del estado de un sistema físico, implica dar por supuesto que existen unas propiedades objetivas que corresponden a dichas variables. De esta manera, según EPR, las descripciones que niegan la existencia real de las variables dinámicas, como la interpretación de Copenhague, resultan incompatibles con la noción de realidad física, la cual debe partir del presupuesto de que los sistemas físicos poseen una existencia objetiva que resulta independiente de la selección de tal o cual marco teórico utilizado para su interpretación. En este sentido, Einstein contraponía a la interpretación de Copenhague su afirmación: “todavía creo en la posibilidad de un modelo de la realidad, es decir, de una teoría que represente las cosas en sí mismas y no tan sólo la probabilidad de su ocurrencia”⁹¹, con lo que descalificaba los intentos por establecer ontologías radicalmente diferentes para el mundo macroscópico y para el mundo microscópico, algo que a sus ojos creaba particiones innecesarias en la realidad que iban en contra de su concepción del universo como un todo regido por una sola ontología.

Hasta entonces, es decir hasta mediados de la década de los veinte del siglo XX, los estudiosos de la naturaleza habían considerado que era perfectamente posible llevar a cabo experimentos sobre la base del presupuesto de que eran observadores pasivos de la naturaleza, en el sentido de que podían medir sus propiedades y recolectar datos sobre él sin perturbarlo significativamente. Se trataba de una clara distinción entre sujeto y objeto en la cual el segundo se limitaba a ser una realidad dada en susceptibilidad de ser conocida sin ser cambiada por el mero hecho de ser observada. Sin embargo, como se ha visto, los experimentos en física cuántica implican un intercambio de energía en el proceso de medición que trae aparejada una perturbación ineludible sobre lo medido. Esto podría interpretarse como un efecto natural de la naturaleza susceptible de los

⁹¹ Ibíd., p. 335.

sistemas cuánticos a la interacción con fotones o cuantos de energía; sin embargo, la interpretación de Copenhague fue más allá y aseguró que, debido al postulado cuántico que estipula la existencia de una discontinuidad inherente a la naturaleza de los procesos cuánticos, resulta imposible realizar una distinción clara entre el observador y aquello que es observado. Para Bohr, aquella interacción invasiva que se evidenciaba en la perturbación de lo medido por el aparato de medida hacía evidente la imposibilidad de atribuir una realidad independiente, en el sentido ordinario, al fenómeno o a la instancia observadora. Es decir que, para Bohr y la interpretación de Copenhague, la realidad, en ausencia de un observador, resulta inexistente; un objeto microfísico carecería de propiedades intrínsecas más allá del acto de medición. Así resume Manjit Kumar la noción de realidad que se encontraba en la base de la interpretación de Copenhague y a la cual Einstein, Podolsky, Rosen y otros científicos se opusieron contundentemente: “El electrón simplemente no existe en ningún lugar hasta el momento en que, para ubicarlo, llevamos a cabo una observación. Y tampoco posee velocidad ni atributo físico mensurable alguno. Es absurdo por ello preguntarse cuál es la posición o la velocidad, entre medida y medida, de un electrón. Y, puesto que la mecánica cuántica no dice nada sobre la existencia de una realidad física independiente del equipo de medida, el electrón sólo es real en el acto de la medida o, dicho de otro modo, el electrón que no es observado no existe”⁹².

Sin embargo, como se ha mencionado, para Einstein y sus adeptos, el principio de que existe una realidad independiente del observador resulta esencial para la práctica científica y, aunque se trata de una hipótesis filosófica indemostrable como tal empíricamente, resulta un principio básico perfectamente razonable puesto que de no ser aceptado llevaría a los absurdos del solipsismo que supone que la única realidad existente es la realidad que se observa y se crea en el acto de observación. Para Einstein, Podolsky y Rosen, pues, es insostenible adjudicar

⁹² Ibíd., p. 348.

un papel privilegiado al observador sustentado en el principio de complementariedad de Bohr, esa resultaba para ellos una salida muy fácil para enfrentar las paradojas que se suscitaban en el mundo cuántico. Según estos científicos, asumir tal posición, significaba poner freno a la búsqueda de una explicación más satisfactoria capaz de unificar de manera coherente los mundos clásico y cuántico sobre la base de una única ontología de carácter realista y objetivo. Ésta crítica de Einstein y sus adeptos a la noción de realidad inmersa en la interpretación de Copenhague no fue aceptada por quienes sostenían la validez de ésta última; Heisenberg dijo que, el presupuesto de Einstein de que en el marco de la física cuántica existe “un mundo objetivo y real cuyas partes más pequeñas existen objetivamente en el mismo sentido en que lo hacen las piedras o los árboles, independientemente de que las observemos o no suponía un retroceso a la visión materialista prevalente en las ciencias naturales del siglo XIX”⁹³. A la luz de éstos contra-argumentos, quienes sostuvieron la validez de la interpretación de Copenhague, comenzaron a ver en Einstein a un científico anclado en los modelos teóricos del pasado que se resistía a aceptar las innovaciones provocadas por la nueva física. Sin embargo, lejos de poseer una mentalidad reaccionaria con respecto a las ideas científicas, Einstein, aunque jamás abandonó la ontología presupuesta por toda la física precedente y que afirmaba la existencia de una realidad objetiva, que existe independientemente del observador, tenía toda su disposición para realizar una ruptura con la física clásica. Incluso podría decirse, como se verá a continuación, que los anhelos de Einstein por transformar sustancialmente la física, debían ir incluso más allá de los desarrollos de la física cuántica; esta, a su juicio constituía sin duda uno de los logros más importantes de las ciencias naturales modernas pero, no obstante su innegable valor, resultaba ser una teoría transitoria que debía dar paso a una teoría mucho más general, unificada y capaz de abarcar de manera consistente tanto los fenómenos macroscópicos como los fenómenos ultramicroscópicos que, de momento, se encontraba investigando la física cuántica.

⁹³ *Ibíd.*, p. 420.

Así, en segunda instancia, la crítica de Einstein, Podolsky y Rosen se dirigió contra la presunta completitud que la interpretación de Copenhague adjudicaba a la física cuántica. Recordemos que Bohr, Heisenberg y los científicos adeptos a la interpretación de Copenhague habían sugerido que, también en virtud del principio de complementariedad, la física cuántica al igual que la física clásica, constituyen teorías completas en el sentido de que dicen todo lo que pueden decir con respecto al campo de la física al cual se circunscriben y que nada tiene que decir la una de la otra, constituyéndose ambas como áreas de la física autónomas sin posibilidad de experimentar desarrollos significativos ulteriores. En el congreso de Solvay de 1927, Heisenberg, refiriéndose a la consideración de la interpretación de Copenhague de que la física cuántica constituye una teoría completa afirmó que “nosotros consideramos que la mecánica cuántica es una teoría cerrada, cuyos supuestos físicos y matemáticos básicos no son susceptibles de cambio ni modificación alguna”⁹⁴. Pues bien, precisamente EPR afirmaron que la física cuántica es una teoría incompleta puesto que existen elementos de la realidad que aún no han sido incorporados en su aparato formal y que darían razón, en buena parte, del comportamiento aparentemente extraño de los procesos del mundo ultramicroscópico. Las acusaciones de incompletud que EPR dirigían contra la interpretación de Copenhague y contra el aparato formal de la física cuántica en sí, son indesligables de su suposición de que el mundo cuántico constituye una esfera de la realidad objetiva al igual que otros ámbitos como aquellos que estudia la física clásica, de tal forma que el formalismo teórico utilizado por la mecánica cuántica debe abarcar todos los factores significativos que se encuentran involucrados en los procesos de la realidad cuántica. EPR afirmaban que “cualquier consideración seria de una teoría física debe tener en cuenta la diferencia que existe entre la realidad objetiva, que es independiente de cualquier teoría, y los conceptos físicos con que esa teoría opera. Se pretende que estos conceptos se correspondan con la realidad objetiva, y por medio de sus conceptos

⁹⁴ *Ibíd.*, p. 344.

nos imaginamos esa realidad”⁹⁵. De esta manera, para que la física cuántica pueda ostentar coherencia con el mundo objetivo, debe existir una relación isomorfa entre los elementos de realidad y los elementos teóricos formulados a manera de símbolos matemáticos que, articulándose de una determinada manera, constituyen el aparato formal de la teoría.

Einstein, Podolsky y Rosen, para calcular el éxito y la aceptabilidad de la física cuántica, se preguntan si ésta es una teoría correcta y, en seguida, si se trata de una teoría completa. Para responder a la primera cuestión postulan el siguiente criterio definitorio: “la corrección de una teoría depende del grado de coincidencia entre las conclusiones de la teoría y la experiencia humana”⁹⁶. Como se ha dicho, la física cuántica, a pesar de su carácter probabilístico, constituye una de las teorías más exitosas formuladas en la historia del pensamiento científico, por lo que la coherencia entre las conclusiones que se derivan a partir de la teoría y la experiencia humana, dada en términos de experimento y medida, parece más que justificada. Debido a lo anterior, EPR, responden afirmativamente a la condición de corrección de la física cuántica; ésta teoría física es correcta debido a que se encuentra en consonancia con los resultados experimentales que predice; sin embargo, para EPR, resulta necesario que la teoría satisfaga también la condición de completitud, y, frente a este respecto su respuesta se tornó negativa puesto que, a su juicio, incumple con el siguiente criterio. Para Einstein, Podolsky y Rosen, para que una teoría se pueda considerar completa debe cumplir con la condición de que “todo elemento de la realidad física debe tener su contrapartida en la teoría física”⁹⁷. Como se había dicho, según EPR, en el aparato formal de la física cuántica aún no se encuentran incorporados todos los elementos de realidad que resultan significativos o relevantes en los procesos cuánticos, con lo que resulta imposible atribuirle a ésta teoría la condición de completitud, algo que a sus ojos, repercutía en que la física cuántica sería una teoría transitoria con una

⁹⁵ Ibid., p. 398.

⁹⁶ Ibid., p. 399.

⁹⁷ Ibid., p. 399.

amplia susceptibilidad de ser enriquecida y hasta transformada significativamente. Pero, ¿a qué se referían precisamente EPR con “elementos de realidad”? En lugar de sumergirse en una compleja disertación filosófica acerca del concepto de realidad objetiva, un problema que tantas complicaciones había encontrado a lo largo de la historia de la filosofía, EPR esgrimieron un argumento que consideraron suficiente y razonable para el caso: en virtud del isomorfismo que, a su juicio, debía existir entre el lenguaje teórico y la realidad objetiva, dijeron que “si, sin perturbar, en modo alguno, el sistema, podemos predecir con certeza (es decir con probabilidad igual a 1) el valor de determinada magnitud física, esa magnitud posee un elemento de realidad”⁹⁸, y como, por ejemplo, en virtud del principio de incertidumbre, se hacía imposible calcular dos propiedades simultáneas, dos “elementos de realidad”, como la posición y el momento, luego resultaba que en el formalismo matemático de la física cuántica, según EPR, aún no estaban incorporados todos los elementos de realidad significativos y, entonces se trataba de una teoría incompleta. Según EPR, la física cuántica no podía ser una teoría completa y fundamental de la naturaleza de los procesos ultramicroscópicos puesto que en ella quedaban por fuera elementos significativos de la realidad objetiva; para que ésta teoría pueda ser considerada completa, “debe haber, entre un elemento de la teoría y un elemento de la realidad, una correspondencia unívoca. Una condición suficiente para establecer la realidad de una cantidad física como el momento, por ejemplo, es la posibilidad de predecirla con certeza sin perturbar el sistema. Si existía un elemento de realidad física que no se viese explicado por la teoría, tal teoría necesariamente sería incompleta”⁹⁹.

Según Einstein, Podolsky y Rosen, cuando el principio de incertidumbre señala que al medir con exactitud el valor del momento de una partícula, esto se verá reflejado en una imprecisión para medir la posición de la misma, no se está

⁹⁸ Citado por: PAZ, Juan Pablo. Einstein contra la mecánica cuántica: el azar, la ignorancia y nuestra ignorancia sobre el azar. Buenos Aires: Departamento de Física “José Giambiagi”, 2006. p.7.

⁹⁹ KUMAR. Op. cit., p. 400.

demostrando que dicha partícula carezca de posición definida; lo que se estaría demostrando, según EPR, es que en el formalismo de la física cuántica aún no ha sido formalizado dicho elemento de la realidad correspondiente a la posición, lo cual sería la causa del impedimento para medir el valor de su posición con precisión, al mismo tiempo que se mide con precisión el valor de su momento. Esto fue ilustrado por los científicos aludidos a través de la elaboración de un experimento mental. Tal experimento consistía en lo siguiente: dos partículas, *a* y *b* interactúan en un momento y posteriormente se desplazan en direcciones contrarias. Como sabemos, el principio de incertidumbre proscribía una medición simultánea y precisa de la posición y del momento de cada una de las partículas, pero el mismo no proscribía la medición simultánea y exacta del momento total de las dos partículas y la distancia relativa existente entre ambas. En este experimento mental, es esencial reconocer que se puede conocer el momento de *b* sin realizar ninguna observación directa sobre dicha partícula; sólo se necesita conocer exactamente el valor del momento de *a*, lo cual proporcionará la información sobre el momento exacto de *b*. De esta manera, es posible, en virtud de la ley de conservación del momento, conocer de manera indirecta pero exacta el momento de *b* a través de la medición que permita conocer el momento de *a*. Además, según el criterio de realidad de EPR, es posible conocer la posición exacta de ambas debido a que podemos calcular la distancia que separa a la partícula *a* de la partícula *b*. De esta manera, según el experimento mental de EPR, es posible medir con precisión y simultáneamente tanto la posición como el momento de ambas partículas, de lo cual se deduce que tales propiedades con valores precisos constituyen elementos de la realidad objetiva. Y así, como de acuerdo con el principio de incertidumbre, se prohíbe medir simultáneamente y con exactitud dichos pares de propiedades, de acuerdo con el experimento mental ideado por EPR, resultaba que dicho principio, en lugar de demostrar una limitación insalvable en la determinación precisa y simultánea de tales propiedades, lo que demostraba es que tales propiedades, consideradas por EPR

como elementos de realidad, carecen de contrapartida teórica en la física cuántica con lo cual la misma debía ser considerada incompleta.

En tercer lugar, como parte de la crítica dirigida por Einstein, Podolsky y Rosen contra la interpretación de Copenhague, se consideró incorrecto atribuirle a la física cuántica un carácter puramente probabilístico. Debido, precisamente a la incompletud de la teoría, incompletud que implicaba la ausencia de elementos significativos de la realidad en el aparato formal, EPR supusieron que tales elementos de realidad ausentes en el formalismo, debían corresponder a parámetros ocultos que explicarían el aparente devenir aleatorio, indeterminista o puramente probabilístico que al parecer ostentaban los sistemas cuánticos. La mecánica cuántica, según EPR, debería incorporar dentro de su formalismo elementos de realidad que por el momento permanecen ausentes y que ayudarían a explicar el carácter aparentemente indeterminístico de los procesos cuánticos. Según ésta interpretación resulta inaceptable la afirmación de Bohr de que después de las interacciones entre aparatos de medición y sistemas físicos, ni el observable medido ni las lecturas del indicador tienen valores determinados pues para EPR, los procesos cuánticos existen con sus propiedades bien definidas independientemente de nuestra observación y de los procesos de medición que se llevan a cabo. Según Heisenberg, “los átomos o las partículas elementales no son tan reales (como los objetos del mundo cotidiano) y no configuran, en consecuencia, un mundo de cosas y hechos sino de potencialidades o posibilidades”¹⁰⁰. Pero para Einstein, El mundo existe como la luna tras las nubes, aunque no se lo esté observando. La deficiencia estaría en el aparato formal que se utiliza para conocer los sistemas cuánticos, en él no están formalizados todos los elementos de la realidad física significativos y necesarios para explicar el comportamiento de tales sistemas.

¹⁰⁰ Citado por KUMAR. Op. cit., p. 349.

El científico neerlandés Hendrik Lorentz (1853-1928), un importante físico y matemático, en el congreso de Solvay de 1927, se preguntaba después de las intervenciones de Bohr y Heisenberg, entre otros, acerca de problemas relativos con la causalidad, el determinismo y la probabilidad. “¿Se hallan los eventos cuánticos causados o no?...¿acabaremos convirtiendo la falta de determinismo en un artículo de fe?, ¿estamos obligados a elevar el indeterminismo a la categoría de principio?”¹⁰¹. Estas cuestiones quedaron planteadas sobre la mesa sin una respuesta concisa, pero, de manera implícita los miembros de la interpretación de Copenhague estaban dispuestos a resolverlas de manera afirmativa. Para ellos la física cuántica no proporciona ninguna información con respecto a procesos cuánticos individuales, sino a conjuntos o agregados de procesos, en los cuales es imposible determinar las propiedades individuales de los elementos constitutivos con lo cual, por ejemplo, la probabilidad proporcionada mediante la resolución de la ecuación de onda respectiva a un procesos cuántico, no ofrece al experimentados la probabilidad de encontrar un electrón específico en un punto estadísticamente determinado, sino la probabilidad de encontrar en ese mismo punto, a cualquiera de los electrones constitutivos de ese conjunto que integra el sistema cuántico. Esto encierra un carácter totalmente aleatorio para los procesos subatómicos tomados en su carácter de individualidad, planteándose únicamente la posibilidad de calcular promedios estadísticos con respecto a agregados complejos de procesos subatómicos. Einstein, Podolsky y Rosen se opusieron esta perspectiva declarándola puramente estadística que excluye la posibilidad de encontrar patrones de regularidad al interior de los procesos cuánticos, con lo cual se desterraría por completo la posibilidad de establecer una imagen determinista del mundo cuántico. Como se ha visto, para EPR, es posible y necesario plantear dicha aleatoriedad e indeterminismo en los procesos cuánticos en términos de fenómeno aparente, es decir, señalando que tales propiedades adjudicadas a los procesos cuánticos son causa de una insuficiencia epistémica para determinar todas la variables dinámicas involucradas y que explicarían en términos de causas

¹⁰¹ Ibid., p.347.

ocultas, el aparente devenir azaroso e indeterminista de los procesos ultramicroscópicos. Para Einstein y sus adeptos, la física cuántica “puede ser una teoría correcta de las leyes estadísticas, pero es una concepción inadecuada de los procesos elementales individuales”¹⁰² con lo que quería decir que el carácter probabilístico de la realidad cuántica estaba sustentado en el hecho de que la física cuántica no ha podido llegar a penetrar en la profundidad de los procesos ultramicroscópicos que estudia, limitándose a un estudio superficial en el que puede acceder de manera estadística, a causa de que no conoce los patrones que subyacen en lo más profundo del mundo cuántico y que restituirían un orden determinista, por el momento inaprensible.

De esta manera, la física cuántica, para EPR, encierra un gran avance en el conocimiento de la naturaleza más íntima de la materia, pero de momento sólo provee un abordaje estadístico incapaz de penetrar en un nivel en el que se esclarezcan todos los elementos relevantes de la realidad objetiva. Según estos científicos, es debido a tal razón que la teoría sólo es capaz de ofrecer posibilidades en donde, en realidad, debe existir certidumbre. Según EPR, es posible imaginar que existen en la naturaleza variables dinámicas microscópicas que la ciencia aún no ha sido capaz de descubrir. Tales variables dinámicas, usualmente denominadas “variables ocultas” ayudarían a concebir la posibilidad de que es nuestra ignorancia sobre el comportamiento y la naturaleza de los procesos cuánticos la verdadera responsable de la aleatoriedad observada en los resultados de ciertos experimentos. O sea que se puede considerar la posibilidad de que repitiendo distintas veces un mismo experimento sin que se controle el comportamiento de las variables ocultas, estaríamos generando sistemas que en realidad carecen de identidad entre sí. “En cada realización experimental, en cada evento, los resultados de los experimentos estarían completamente determinados por los valores ocultos. Pero al repetir muchas veces el mismo experimento podríamos obtener resultados distintos distribuidos de manera aparentemente

¹⁰² Ibid., p. 365.

aleatoria. Esta aleatoriedad sería simplemente una consecuencia de nuestra ignorancia”¹⁰³.

Es posible observar, que con base en tales críticas, Einstein, Podolsky y Rosen parecen sustentar una posición cercana al determinismo laplaceano que se había sustentado como una máxima irrefutable sobre la base de la física clásica. En dicho determinismo clásico, el azar, la casualidad, lo contingente y lo probabilístico eran concebidos, no como posibles rasgos inherentes a la realidad objetiva de los procesos físicos, sino como un síntoma de ignorancia humana; como la demostración de que la mente humana puede verse cohibida por limitaciones epistémicas que le impiden determinar con certeza el orden subyacente a los procesos de la naturaleza. Einstein, al igual que Laplace, sostenían que el universo se encuentra enteramente ordenado en términos de acciones causales y regularidades estrictas, de lo cual se infería la posibilidad de que con el ulterior desarrollo de la ciencia y la técnica experimental, sus limitaciones cognoscitivas podrían ir siendo progresivamente superadas, encontrando la manera de eliminar el azar y la casualidad, para dar razón con mayor profundidad del orden objetivo que rige tras los procesos del mundo físico. Ésta posición se vio fortalecida para sus defensores gracias a que en 1905, Einstein había explicado el movimiento browniano, que podría ser tomado como un fenómeno físico en el que intervienen parámetros ocultos, que en tal caso serían las moléculas del fluido el que se encuentran suspendidas las partículas de polen. Así, según los estudios de Einstein, detrás del movimiento aparentemente errático de las partículas de polen, debía señalarse la existencia de que tal movimiento errático se debía a la acción dinámica producida por las moléculas, una acción imperceptible, pero no por ello carente de realidad objetiva.

En cuarta instancia y finalmente, la crítica de EPR contra la interpretación de Copenhague se enfoca en el sentido de que ésta última sugiere la transgresión del

¹⁰³ PAZ. Op. cit., p.8.

principio de localidad. El principio de localidad restringe la posibilidad de que las acciones causales se sucedan de manera instantánea; no es posible el intercambio de información a una velocidad mayor que la de la luz, lo cual había quedado instituido desde que Einstein desarrolló la teoría especial de la relatividad. Así, para EPR resulta inaceptable la acción a distancia entre dos partículas que conforman un sistema cuántico complejo puesto que la relación de causa a efecto necesita un lapso en el tiempo y una sucesión en el espacio para producirse, de lo contrario iría en contra de la premisa de que nada viaja más rápido que la luz. Para demostrar cómo las predicciones de la mecánica cuántica de la interpretación de Copenhague chocan con el principio de localidad, EPR imaginaron un experimento mental en el que se toman dos partículas que interactuaron en el pasado y que quedan en un estado entrelazado. Ambas partículas son tomadas por dos respectivos observadores que se distancian, uno del otro, hasta que su interacción se hace despreciable; así, cuando uno de ellos realiza la medición de una propiedad de la partícula como la inercia, sabría inmediatamente cuál es el valor de inercia de la otra partícula entrelazada; de igual manera, si mide la posición de su partícula podría saber inmediatamente, en razón del entrelazamiento cuántico, cuál será el valor de posición de la otra partícula entrelazada, lo mismo sucedería con otras propiedades como el momento, el espín o la energía. Ahora bien, esto implicaría una acción inmediata a distancia que trasgrede el principio de localidad al estipular la posibilidad de interacción a velocidades mayores que la de la luz, lo cual resulta absurdo para EPR, y por lo tanto viene a ser un síntoma de la inconsistencia de la mecánica cuántica, cuyos resultados van en contravía de ciertas máximas aferradas al imaginario científico como el principio de localidad. Así, resultaba totalmente inaceptable para EPR, que la afección de una partícula a través, por ejemplo, de la medición de una de sus propiedades, pudiera afectar de manera instantánea a otra partícula correlacionada y que se encuentre separada de ella por una distancia posiblemente astronómica:

tal colapso instantáneo de la función de onda” implica la propagación de algún tipo de relación causa –efecto más veloz que la luz, algo que, según la teoría especial de la relatividad, resulta imposible. Si un evento en A es la causa de otro evento en B debe haber, entre ambos, un lapso en el tiempo que permita la transición de una señal, a la velocidad de la luz, desde A hasta B. Einstein creía que la violación de este requisito, al que posteriormente denominó localidad, indicaba la incoherencia de la interpretación de Copenhague¹⁰⁴.

Einstein, refiriéndose a esa acción no-local que se aceptaba a la luz de la interpretación de Copenhague, utilizó la expresión, un tanto burlesca, de “misteriosa acción fantasmal a distancia”.

Aceptar la no localidad implicaría, no sólo contrariar la teoría especial de la relatividad sino, como ya se dijo, contrariar la noción de relación causal, puesto que ésta implica siempre una relación en el tiempo donde la causa siempre precede al efecto, pero la no-localidad implicaría una sucesión inmediata y a distancia sin un lapso intermedio de tiempo entre la emergencia de la causa y la consecuente producción del efecto. Sin embargo, abandonar la causalidad tal como se la había concebido en el marco de la mecánica clásica es precisamente lo que demandan Bohr y la interpretación de Copenhague pues, en el mundo cuántico hay leyes que son exclusivas de su dominio y que resultan transgresoras si se las extrapola a dominios ajenos al que les es propio. Bohr no aceptó los argumentos expuestos por Einstein, replicando que la Mecánica cuántica no es una teoría incompleta sino una teoría completa que describe un mundo cuyas leyes son diferentes de las reglas del mundo clásico que nos es familiar, en el cual se hacen usuales los procesos en el tiempo de causa a efecto y se proscriben las acciones a distancia y los fenómenos no locales. Es necesario mencionar aquí, que con el tiempo, distintos experimentos terminaron por dar aval científico a la no-localidad, demostrándose que efectivamente, es posible que dos partículas

¹⁰⁴ KUMAR. Op. cit., p. 352.

considerablemente separadas en el espacio puedan interactuar de manera instantánea, a velocidades más rápidas que la de la luz. Recientemente, en octubre de 2015, científicos holandeses realizaron experimentos que inclinaron la balanza hacia el lado de la no-localidad en los procesos cuánticos¹⁰⁵. Esto ha resultado un hecho sorprendente, y sus implicaciones aún se están estudiando para examinar las aplicaciones que de dicho fenómeno se podrían obtener en campos como la informática. Más adelante se retomará la cuestión de la no-localidad.

Y así, Einstein, Podolsky y Rosen intentaron refutar la interpretación de Copenhague, atacándola desde diferentes flancos, aunque todos los argumentos que esgrimieron se encontraban íntimamente interrelacionados para socavar la supuesta completitud de la teoría y para develar las presuntas inconsistencias de la misma. EPR han intentado restituir el determinismo en la física cuántica en contra de la Interpretación de Copenhague que ha intentado precisamente echarlo por tierra. Sin embargo, al parecer, la posición de EPR ha sido la de intentar salvar el determinismo en el sentido clásico que ya Laplace había esbozado, lo cual parece resultar del todo inconsistente a la luz de la evidencia científica que la física cuántica ha ido proporcionando de una manera cada vez más contundente. La posición de EPR, ha sido la de considerar que el determinismo excluye la posibilidad de considerar procesos objetivamente probabilísticos y no-locales; en tal orden de ideas quedan desterrados la casualidad, la contingencia y el azar de cualquier visión determinista del mundo. Por su parte, la posición de la interpretación de Copenhague ha sido la de instituir el indeterminismo como un principio evidente a la luz de la física cuántica, planteando el hecho de que el carácter probabilístico, discontinuo e irregular de los procesos cuánticos excluye, con la misma fuerza que en EPR se excluye la probabilidad objetiva de la visión determinista del mundo, la existencia de patrones causales que sustenten la

¹⁰⁵ Se puede encontrar información sobre éstos descubrimientos recientes en sitios de internet como <http://www.lr21.com.uy/tecnologia/1262051-experimento-cuantico-einstein-principio-localidad>.

posibilidad de una concepción determinista de los fenómenos cuánticos, aunque dicha concepción determinista no sea equivalente a la vieja visión determinista planteada en términos laplaceanos. En cualquier caso, la concepción de EPR y la concepción de la interpretación de Copenhague convergen en un punto: en considerar que la probabilidad objetiva de los procesos físicos y la acción causal propia del determinismo son dos cosas por entero incompatibles. Ambas posiciones se decantan por un abordaje unilateral, tomando partido por uno de éstos dos aspectos adjudicables a la realidad física y rechazando tajantemente el otro. Tal situación ha planteado un dilema determinismo-indeterminismo que no se ha podido resolver satisfactoriamente, quedando tal contraposición abierta al debate, en el cual el presente trabajo ha decidido concentrarse. Karl Popper, procurando asumir una posición intermedia entre las conclusiones deterministas o indeterministas que se puedan extraer de los desarrollos de la física cuántica dijo que:

La tarea del científico de la Naturaleza es buscar leyes que le permitan deducir predicciones; y es posible dividir esta tarea en dos partes: por un lado, tendrá que intentar descubrir leyes que le permitan deducir predicciones aisladas (leyes “causales” o “deterministas”, o “enunciados precisos”); por el otro, ha de tratar de proponer hipótesis acerca de frecuencias —esto es, leyes que afirmen probabilidades—con objeto de deducir predicciones frecuenciales. No existe nada en estas dos tareas que las haga mutuamente incompatibles en ningún respecto : sin duda alguna, no ocurre que siempre que presentemos enunciados precisos no debamos hacer hipótesis frecuenciales, pues —como hemos visto— a algunos de aquéllos corresponden macro-leyes deducibles de asunciones frecuenciales; ni tampoco ocurre que siempre que haya enunciados frecuenciales perfectamente confirmados en un campo particular, estemos autorizados a concluir que en dicho campo no se puedan proponer enunciados precisos. Esta situación parece perfectamente clara, y, sin embargo, la segunda de las conclusiones que acabamos

*de rechazar se ha propugnado repetidamente: una y otra vez nos encontramos con la creencia de que donde rige lo fortuito la regularidad está excluida*¹⁰⁶.

Con esto, al menos, se persuade de la necesidad de evitar un abordaje unilateral acerca de la cuestión, considerando la posibilidad de que el determinismo y la probabilidad objetiva puedan encontrar puntos de convergencia, pues, para Popper no queda excluido el caso en el que “la aleatoriedad o desorden pueda considerarse como un tipo de orden, y de que quepa construir modelos objetivos de ella”¹⁰⁷. En todo caso, y retomando la cuestión de la controversia entre EPR y la interpretación de Copenhague, es necesario decir, para finalizar este apartado, que lo importante de ésta controversia no reside en que se haya logrado dar solución al problema del determinismo en la física cuántica, sino en que gracias a ella se han hecho entrever tanto las inconsistencias de asumir una posición determinista en el sentido clásico como las inconsistencias de asumir una interpretación puramente indeterminista. El debate entre EPR acerca de si la naturaleza de la realidad cuántica es determinista o indeterminista dista bastante de ofrecer una respuesta satisfactoria a este dilema. Sin embargo, el mismo ha abierto la emergencia de una cantidad considerable de alternativas interpretativas concernientes al problema del determinismo. Estas alternativas siguen desarrollándose hasta la actualidad, y cualquiera de ellas que se proponga dirigirse hacia un esclarecimiento del problema del determinismo necesariamente deberá remitirse al debate interpretativo entre EPR y la interpretación de Copenhague, pues en el mismo se hicieron evidentes las paradojas que la física cuántica plantea a nuestra concepción de la realidad ultramicroscópica, paradojas que exigen una revisión de las nociones que han configurado nuestro cuadro general del mundo. Así, resultaría difícil tomar partido por una de las dos interpretaciones planteadas en éste apartado; muy probablemente, la respuesta estará en irse encaminando hacia el desarrollo de una interpretación *sui generis*

¹⁰⁶ POPPER. Op. cit., p. 229.

¹⁰⁷ Ibid., p. 337.

capaz de sintetizar de manera coherente los aciertos de cada una, evitando abordajes unilaterales y, por el contrario, dilucidando las relaciones específicas entre determinismo y probabilidad, entre lo necesario y lo casual, entre el orden estable y la aleatoriedad; pues, es muy probable, que estos aspectos se encuentren entrelazados en el complejo entramado de la realidad. En el siguiente apartado se examinarán las alternativas interpretativas que se han desarrollado posteriormente al debate entre EPR y la interpretación de Copenhague con respecto al determinismo para, después, pasar a plantear algunas conclusiones que se desprenden después de haber recorrido este camino hacia un análisis del determinismo en la física cuántica.

2.3.3. El determinismo en las distintas interpretaciones de la mecánica cuántica después del debate EPR/Copenhague

Como se ha podido mostrar, analizar el problema del determinismo a la luz de los planteamientos de la física cuántica es una cuestión bastante compleja. Se ha considerado que para dirigirse hacia un abordaje de dicha cuestión es fundamental asumir una disposición filosófica que permita una aproximación interpretativa más allá de lo que proporcionan los acercamientos experimentales del mundo cuántico y de los aparatos formales desarrollados para la investigación de tal bagaje experimental. En el apartado anterior, la controversia entre Einstein, Podolsky y Rosen y la Interpretación de Copenhague hizo explícitas las dificultades para abordar el problema del determinismo en la física cuántica, planteándose la necesidad de ir más allá de ambas interpretaciones para procurar una aproximación más satisfactoria de la cuestión. Sería insuficiente, por lo tanto, circunscribir el problema del determinismo en la física cuántica al debate Copenhague-EPR, pues como ya se planteó, la importancia de tal debate no reside en que haya resuelto la cuestión sino en que sirvió para explicitar las inconsistencias de asumir abordajes unilaterales de la cuestión y para mostrar los retos que tendrá que asumir cualquier interpretación de la física cuántica que

aspire a la coherencia. Por tal razón, a continuación se presentará un esbozo de las interpretaciones más sobresalientes que se suscitaron después del debate EPR-Copenhague, tratando de hacer patente lo que cada una de ellas ha considerado con respecto al problema del determinismo en particular.

a) *Interpretación estadística de la mecánica cuántica o interpretación conjunta*

Esta interpretación fue planteada por Max Born a mediados de los años veinte del siglo pasado y constituye, junto con el principio de incertidumbre de Heisenberg y el principio de Complementariedad, así como al principio de Von Neumann, como uno de los pilares de una interpretación más amplia, la de Copenhague. Se había señalado ya en apartados previos cómo Born concibe los procesos cuánticos desde una perspectiva puramente probabilística reinterpretando la ecuación de Schrödinger sobre una base igualmente probabilista como una ecuación abstracta que señala las posibilidades de un sistema de desplegarse en uno u otro modo, pero nunca con rígida certeza, asumiendo de esta manera una postura indeterminista. Pues bien, hay que agregar que, según ésta interpretación, la función de onda se describe no como algo aplicable a un sistema cuántico individual sino a un complejo entramado de múltiples sistemas preparados. Es de esta consideración de la que se desprende que lo único que puede determinar la función de onda son las propiedades estadísticas de dichos conjuntos de sistemas. En esta interpretación, Born asume que un sistema cuántico puede representarse abstractamente como un conjunto de corpúsculos materiales a los cuales se les puede atribuir coordenadas y momentos, pero agrega que estas propiedades se encuentran indeterminadas en virtud de su carácter estocástico que constituye una propiedad objetiva de la realidad cuántica. Así, ya que el mundo ultramicroscópico se encuentra totalmente marcado por la probabilidad objetiva es imposible asumir, según Born, una perspectiva causal que explique la dinámica de los procesos cuánticos. Dice Born, refiriéndose a la reinterpretación probabilística de la ecuación de Schrödinger y a sus implicaciones sobre la

causalidad y el determinismo, que “... la mecánica ondulatoria de Schrödinger es capaz de dar una respuesta total a preguntas sobre el efecto de la colisión, pero no puede establecer ninguna relación de causalidad. No tiene respuesta a la pregunta de ¿cuál es el estado después de la colisión?, sino más bien a la pregunta de ¿cuál es la probabilidad de un determinado efecto de la colisión?”¹⁰⁸. Con esto, según Born, es posible dar razón de los efectos experimentados de manera aleatoria al interior de los procesos cuánticos, pero dichos efectos no pueden ser puestos en relación con causas específicas a las cuales se encuentren coherentemente vinculados: “Desde el punto de vista de nuestra mecánica cuántica no hay ninguna magnitud que en un caso individual establezca causalmente el efecto de la colisión. (...) Yo personalmente me inclino por renunciar al determinismo en el mundo atómico”¹⁰⁹.

Según la interpretación estadística de Born, pues, la probabilidad cuántica no puede considerarse en términos de que el conocimiento humano con respecto a un estado específico de cosas es imperfecto, sino como una dispersión inherente a la realidad física que se propaga de manera indeterminada según la ecuación de Schrödinger. Born va incluso más allá y declara que el supuesto determinismo que se había considerado como un principio estable en la física clásica es incluso ilusorio en este campo de la física de lo macroscópico. Según Born, si bien el indeterminismo en la física cuántica resulta evidente, debemos agregar también que tampoco en la mecánica clásica es posible encontrar una determinación total de todas las variables que constituyen las propiedades de un sistema macroscópico en todos los instantes y en todas las circunstancias. Sin duda, Born considera que en los procesos que estudia la física clásica, es posible encontrar una regularidad más estable que en los procesos cuánticos, no por ello debemos atribuirle a los procesos macroscópicos un carácter de exactitud o absoluta regularidad; simplemente se trata de que los promedios estadísticos que ostentan

¹⁰⁸ Citado por: GONZALES Fernández, María Pilar. Probabilidad y causalidad en la filosofía de Born. Madrid: Revista “Logos. Anales del seminario de metafísica”, Vol. 38, 2005. p. 252.

¹⁰⁹ *Ibid.*, p. 255.

los sistemas físico-clásicos son mayores, pero de lo cual no es posible desprender una completa ausencia de contingencia o azar. Así, considera Born, que es incorrecto anteponer un supuesto carácter determinista de los procesos macroscópicos para esgrimir que el indeterminismo cuántico es sólo aparente, sobre la base de que sería imposible que a partir de sistemas indeterministas más fundamentales como los cuánticos se estructuren sistemas deterministas como los macroscópicos: “El determinismo de la física clásica resulta ser una quimera, producida por la sobreestimación de los conceptos lógico-matemáticos. Es un ídolo, no un ideal, de las ciencias naturales, y por ello no puede esgrimirse como objeción en contra de la interpretación estadística, por principio indeterminista, de la mecánica cuántica”¹¹⁰. Esta posición, errónea para Born, se debe según él mismo a que también ha sido inconsistente el presupuesto de que en la física clásica es posible una observabilidad absoluta; esto sólo es posible, según Born, en la imaginación, pero se trata de un postulado que no tiene contrapartida en la realidad.

Así, en el marco de la interpretación estadística de Born, es imposible reconciliar la noción de una causalidad preconcebida en la mecánica clásica con la aleatoriedad propia de los sistemas cuánticos que, valga recordarlo, consisten en múltiples sistemas ensamblados, pues, incluso en la física clásica resulta inconsistente. Es necesario, por el contrario, considerar el carácter puramente estadístico de la realidad según Born; sólo así no resultará hiriente la aceptación del indeterminismo en los procesos cuánticos, una premisa que, según éste autor, resulta simplemente inevitable si se pretende avanzar en una representación auténtica de la realidad. La probabilidad objetiva de los procesos ultramicroscópicos resulta un aspecto de la realidad que impide por completo, para Born, la elaboración de un cuadro determinista del mundo que, para él puede ser un consuelo para satisfacer la sed de orden en la imaginación de los científicos pero que resulta inconsistente con lo que muestra la realidad.

¹¹⁰ Ibid., p. 256.

b) “La conciencia causa el colapso de la función de onda” en la interpretación de von Neumann y Wigner

John von Neumann (1903-1957) intentó axiomatizar matemáticamente la física cuántica sobre la base del presupuesto que compartía con la interpretación de Copenhague de que la física cuántica constituye una teoría completa. A su juicio, es imposible sostener la existencia de parámetros desconocidos de la realidad que cumplirían el rol de factores causales que restituirían el determinismo en los procesos cuánticos, tal como EPR habían sugerido. Von Neumann supone que, en virtud del carácter completo de la física cuántica, corroborado, por su coherencia con el éxito experimental y predictivo, resulta imposible restituir el determinismo, ya que el mismo plantearía la necesidad de reconfigurar el aparato formal de la física cuántica, algo que para éste físico resulta totalmente inviable, puesto que implicaría que los fundamentos teóricos, incontrovertibles para él, pueden ser refutados. Así, von Neumann señala que una interpretación determinista de la física cuántica en términos de variables ocultas resulta incompatible con los fundamentos teóricos de la física cuántica, y como él mismo supone que éstos últimos están incontrovertiblemente establecidos, luego concluye que el determinismo debe ser abandonado en los procesos cuánticos.

De ésta manera, von Neumann emprendió un abordaje totalmente abstracto de la física cuántica, haciendo énfasis en su aparato matemático-formal para fundamentar la imposibilidad de que la física cuántica se derive mediante una aproximación estadística a partir de una teoría física determinista. El carácter puramente probabilista que von Neumann atribuye a los procesos ultramicroscópicos va acompañado, además, de un papel decisivo atribuido al observador como factor definitivo para la producción del colapso de estado o de la función de onda. En éste sentido, para von Neumann, el observador ejerce un papel causal, en el sentido de que es él quien produce el colapso que se da como una decantación aleatoria de las propiedades de un sistema cuántico por una u

otra de las alternativas previamente distribuidas entre un rango de probabilidades. En última instancia debe incidir el observador, quien, en su acto de medida provoca que un estado superpuesto se despliegue probabilísticamente hacia algún resultado específico. Pero no se trata sólo de que el acto de medida produzca el colapso de la función de onda de los estados cuánticos superpuestos; se trata de que debe intervenir un ser consciente que logre distinguir el estado definido y diferenciado hacia el cual se produce el colapso. En 1932, von Neumann dio a conocer su trabajo sobre los fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica y, a la par, expuso su interpretación acerca del papel del observador en el proceso de medición y, por lo tanto, su rol en el proceso de colapso de la función de onda. Así fue como asumió que las matemáticas de la mecánica cuántica permiten asumir el colapso de la función de onda como un momento que puede ser ubicado en la cadena causal en la cual la percepción subjetiva cumple el papel determinante, siendo ésta, en última instancia, la que configura el auténtico dispositivo de medición. Es notable que, a pesar, de adjudicar un papel indeterminista a los procesos físico-cuánticos, von Neumann se decanta por atribuir un rol causal y determinante a la consciencia, siendo ésta la única capaz de provocar la definición física de la superposición esencial subyacente a todos los procesos cuánticos cuando los mismos no son partícipes de los procesos de consciencia. Esto es, mientras no sean objeto de la consciencia, los estados de los sistemas cuánticos se encuentran en una permanente superposición de estados.

Más tarde, en la década de 1960, Eugene Wigner (1902-1995), hizo énfasis en la idea de von Neumann de que el único dispositivo de medida verdadero es la consciencia, la única en condiciones de distinguir el estado cuántico definido hacia el cual deviene el colapso en medio de la previa superposición cuántica. Considerando que en la interpretación de Copnehaque, si bien se le había adjudicado al observador que hace la medición el papel determinante en la producción del colapso de estado, no se había esclarecido qué constituye concretamente un observador, Wigner propone, que es la consciencia la que

debe tomarse como la línea de demarcación en la cual se produce el colapso de la función de onda. Se asume aquí que la consciencia corresponde a una parte no-física de la mente y que es la única que puede ser considerada como un aparato de medida; por fuera de ella no existe colapso, este se produce sólo en la esfera subjetiva de la existencia. Esta concepción se basa en la consideración de que sólo la interacción entre un proceso cuántico con uno no-cuántico puede llegar a producir el colapso de los estados cuánticos y como casi todo en el mundo puede ser tratado en términos cuánticos, a excepción de la consciencia, es esta última la única que puede interactuar para producir el colapso de los estados de los sistemas cuánticos. Esto quiere decir que desde el punto de vista del aparato matemático de la física cuántica carece de sentido tratar los aparatos de medida y demás sistemas físicos en el mundo como entidades intrínsecamente diferentes de las colecciones de átomos que corresponden a todos los cuerpos físicos existentes; por lo cual, en virtud del par de suposiciones de que la consciencia no constituye un proceso físico y de que para que se produzca el colapso de la función de onda se requiere de la interacción entre el sistema físico-cuántico y una entidad ni física ni cuántica, se concluye que sólo la consciencia encierra las condiciones para provocar el colapso de la función de onda. Para ilustrar su posición, que recoge la de Von Neumann, desarrolló un experimento mental conocido como *“el amigo de Wigner”*, basándose en una reconstrucción del experimento antes aludido del gato de Schrödinger.

En éste experimento, se supone que la cámara en la cual está encerrado el gato se encuentra, a su vez, en el interior de una cámara más grande en la cual hay otro científico, el amigo de Wigner, quien participa en el experimento, además del propio Wigner que permanece en el laboratorio por fuera de ambas cámaras. Según la interpretación de Copenhague del experimento del gato de Schrödinger, el gato se encuentra en un estado superpuesto que sugiere la situación simultánea vivo/muerto hasta el momento en el cual el observador abre la cámara y corrobora los resultados. Lo mismo sucede en el experimento del amigo de Wigner; sin

embargo, como el científico, el amigo de Wigner se encuentra encerrado en una cámara que contiene a su vez la cámara del gato, Wigner no tiene conocimiento acerca de lo que su amigo ha observado hasta que él mismo se introduzca en la cámara de su amigo para corroborar los resultados preguntándole qué es lo que ha observado al abrir la cámara del gato. Surge entonces la pregunta: ¿se encuentra el gato en un estado macroscópicamente definido en el momento en el que el amigo de Wigner abre la cámara del gato, o tal colapso se produce únicamente en el momento en que Wigner corrobora el resultado del que ha tenido noticia su amigo? Si se asume que el colapso del estado del gato no se produce en el momento en que el amigo de Wigner abre la cámara del gato, sino que hasta tal momento se presenta una superposición de estados “gato vivo-amigo feliz”/“gato muerto-amigo triste”, sería entonces posible aplicar el mismo razonamiento a Wigner con respecto a un tercer observador que, hasta no tener noticia de los datos de la conciencia de Wigner, por lo cual se constituiría una nueva superposición “gato vivo-amigo feliz-Wigner enterado de la no aflicción de su amigo”/“gato muerto-amigo triste-Wigner enterado de la aflicción de su amigo” y así en una sucesión que no se sabría en dónde termina. En tal situación se produce una regresión hasta el infinito conocida como “catástrofe de von Neumann” en la cual el colapso nunca se produciría prácticamente; dicha paradoja sólo encuentra solución si se adopta la posición de que el colapso de la función de onda se produce en el límite marcado por la observación consciente del primer individuo, en este caso, el amigo de Wigner. Así, se concluye que es la conciencia la que produce el colapso de estado en los sistemas cuánticos, es la conciencia la línea que demarca cuándo colapsará la función de onda.

Por lo visto, el punto de vista de von Neumann y Wigner, constituye una perspectiva idealista o subjetivista que introduce un papel determinante de la conciencia en el acaecimiento del colapso de estado de los sistemas físico-cuánticos. Esto resulta, naturalmente incompatible con cualquier interpretación realista o materialista que suele ser un presupuesto consciente o

inconscientemente asumido por la mayoría de físicos. A la misma se le han realizado objeciones, entre las cuales se encuentran la de que tal interpretación conduce al solipsismo, una posición ultra-subjetivista en la cual es la conciencia la que determina la realidad y en la cual lo único que existe, en última instancia es la conciencia configuradora de la realidad. Además se le ha criticado a ésta interpretación en el hecho de que crea un dualismo irreconciliable entre cuerpo y mente (consciencia), en el cual esta última se concibe como una entidad de naturaleza inmaterial, desvinculada totalmente de cualquier proceso físico que se suscite en el cerebro. Roger Penrose (1931), quien se va a adherir a la interpretación de colapso objetivo, considera además que la aparición de la vida consciente se presenta como el resultado de la evolución de ciertos procesos en el universo que no se han presentado siempre, con lo cual, antes de la aparición de formas de vida consciente en el universo, todo lo existente correspondería a una superposición cuántica de estados. También se ha criticado el hecho de que de esta interpretación pueden derivarse concepciones de corte más místico que científico como el panpsiquismo aludido previamente en el apartado concerniente a la perturbación inevitable producida en el acto de medición. En todo caso, más tarde, reconsiderando su posición sobre la base de las críticas planteadas, el propio Wigner procuró tomar distancia de esta interpretación en la que sólo la consciencia produce el colapso de la función de onda. No obstante esto, y lo que es más pertinente para éste trabajo, la posición de Wigner, siguiendo a von Neumann, persistió en considerar que los procesos cuánticos son inherentemente indeterminísticos, una condición que, según ellos sólo podría ser contradicha al precio de resquebrajar los fundamentos formales de la física cuántica, un precio elevado que no están dispuestos a pagar, puesto que comparten junto a la interpretación de Copenhague el presupuesto de que la física cuántica constituye una teoría completa, cuyos principios esenciales están cerrados a cualquier mejoramiento significativo en el ulterior curso del desarrollo científico.

c) Interpretación en términos de variables ocultas y onda piloto

En abierta oposición a la ortodoxia cuántica de la interpretación de Copenhague, David Bohm (1917-1992) desarrolló una interpretación alternativa capaz de fundamentar la física cuántica sobre bases realistas y deterministas. Inconforme con el presupuesto de von Neumann de que el formalismo matemático estándar excluye por completo la posibilidad de incorporar variables ocultas a la física cuántica, Bohm emprendió una brega por demostrar que tal dogma podía y necesitaba ser cuestionado para que la ciencia pueda encaminarse hacia una comprensión más profunda del orden subyacente a la realidad ultramicroscópica. La interpretación de David Bohm, ejemplar paradigmático de lo que implicaría una interpretación en términos de variables ocultas, toma como base las objeciones de EPR a la interpretación de Copenhague relativas al carácter incompleto de la teoría cuántica y a la necesidad de incorporar en ella elementos de realidad por el momento ausentes en su aparato formal. En el núcleo de ésta interpretación se encuentra el postulado de que “la existencia de cantidades físicas aún no observadas y presumiblemente inobservables cuya evolución bajo las leyes adecuadas determinan exactamente el resultado de procesos cuánticos individuales”¹¹¹, como bien apuntó Torreti en 1999. Sin embargo, ésta interpretación, que vendría a conocerse como la interpretación de la onda piloto o, simplemente como interpretación causal, no consiste en una simple reproducción mecánica de la perspectiva de EPR, sino que, como veremos, transgrede sus límites sobre la base de consideraciones que en el marco de ésta última hubieran resultado inaceptables

Bohm comenzó a trabajar en su interpretación, inspirándose en el planteamiento de la “onda piloto” de Louis de Broglie, una consideración que suponía que toda la materia subatómica tiene asociada una onda objetivamente existente que se

¹¹¹ Citado por CALA y ESLAVA. Op. cit., p. 31.

encarga de guiar el curso de las partículas, causando trayectorias definidas aunque muchas veces incognoscibles. Así, los sistemas cuánticos existen objetivamente y su comportamiento se encuentra regido de manera causal por una onda piloto que determina el curso de su desenvolvimiento dinámico temporal. Así, mientras que según la interpretación de Copenhague, Born, von Neumann y otros científicos aludidos, la función de onda representa una entidad abstracta, según la interpretación de la onda piloto de Bohm, esta misma constituye una entidad física real que guía las partículas. “Del mismo modo que las corrientes del océano arrastran a los nadadores y los barcos, la onda piloto genera una corriente que es la responsable del movimiento de la partícula. La partícula posee una trayectoria bien definida determinada por los valores concretos de posición y velocidad que posee en un determinado momento, pero que el principio de incertidumbre oculta, impidiendo al observador verla”¹¹². En esta interpretación, el denominado “vector de estado”, que contiene toda la información sobre las propiedades que determinan el estado de un sistema cuántico, evoluciona regido por la ecuación de Schrödinger y por la ecuación, introducida por Bohm, de la onda guía. Con esto se replantea la dinámica de los sistemas cuánticos en pro de una visión en la que se restituye el carácter objetivo de las propiedades determinantes de los estados sucesivos que a su vez se describen como partícipes de una evolución determinista.

Inicialmente Bohm asumió, al igual que Einstein, la prevalencia del principio de localidad en el que se proscribe la posibilidad de interacciones instantáneas a distancia o más rápidas que la velocidad de la luz. Según tal principio, dos o más procesos o entidades que interactúan, necesitan un lapso en el tiempo para hacer efectivos los resultados de dichas interacciones. En virtud de la teoría de la relatividad especial, resultan imposibles las acciones instantáneas a distancia, sin embargo, la interpretación de Copenhague había ya postulado la posibilidad de que éstas puedan suceder, de tal modo que, dadas dos partículas entrelazadas

¹¹² KUMAR. Op. cit., p. 437.

que se encontrasen separadas por distancias astronómicas, la perturbación o los cambios experimentados por la una, repercutirían instantáneamente sobre el estado de la otra. Ya se había aludido cómo esto resultaba inaceptable para Einstein quien denominó que tal hipótesis sugería la acción de una “misteriosa fuerza fantasmal” que actuaría a distancia sin que requiera un lapso en el tiempo para hacerlo, así sea mínimo. Pues bien, intrigado por los replanteamientos perfectamente razonables de Bohm y por su contradicción con la perspectiva no-local de la interpretación de Copenhague que parecía estar abalada experimentalmente, el científico John Stewart Bell (1928-1990) llevó a cabo una serie de investigaciones enfocadas a resolver le encrucijada de si es posible o no concebir una interpretación de la física cuántica que incorporara, por un lado parámetros ocultos y, por otro lado, conservara el principio de localidad.

Así, John S. Bell, diseñó un teorema, el teorema de Bell, mediante el cual fuera posible poner a prueba si la realidad es local o no lo es. Estableció unos límites cuantitativos que se conocen como “desigualdades de Bell” como puntos definitorios que, de ser sobrepasados darían razón a la no-localidad predicha por la interpretación de Copenhague y que, de ser conservados como límites inviolables, probarían el carácter local de la realidad cuántica. Este teorema que estipula las desigualdades de Bell como el criterio definitorio de la localidad o no-localidad de la realidad cuántica llegó a constituirse como una poderosa herramienta para determinar empíricamente lo que en el contexto del debate entre la interpretación de Copenhague y EPR resultaba ser tan sólo una creencia teórica incontrastable. El razonamiento de Bell es, de manera simplificada, el siguiente: se parte de los dos presupuestos compartidos por EPR. Primero, la realidad física existe de manera objetiva, independientemente de cualquier observación que sobre ella se realice, con sus propiedades que encierran valores bien definidos; y, segundo, esta realidad está caracterizada por el principio de localidad, esto es, las interacciones que se realizan en ella no pueden darse de forma instantánea y a distancia, transgrediendo el límite prefijado por la velocidad de la luz. Ahora,

imagínese una máquina que produce fotones; se supone que los fotones pueden dirigirse, después de ser producidos por la máquina, en tres direcciones diferentes: A, B o C. Cada fotón puede adquirir una y sólo una de las tres direcciones señaladas, de modo que si adquiere la dirección A, no podrá adquirir ni la dirección B, ni la dirección C, situación que se repite para los otros dos fotones cuando adquieren la dirección B o la dirección C. Naturalmente, no se puede determinar de antemano qué fotón será producido en la dirección A, B o C, de tal modo que si se mide en la trayectoria C y no se encuentra ningún fotón, tampoco se puede determinar si el mismo estará asociado a la trayectoria A o B, sólo se descartará la posibilidad de que el mismo esté asociado a la trayectoria C. Lo que sí constituye algo consistente es que, en virtud de que la realidad existe objetivamente con sus propiedades definidas independientemente de la observación, cada fotón habrá de tener una dirección específica que está prefijada desde que fue producido por la máquina.

Ahora bien, agréguese algo más con respecto a la máquina que produce los fotones: ésta posee la propiedad de producir los fotones en pares idénticos, cada uno como un par de fotones asociados a la dirección A, a la dirección B, o a la dirección C. Esto significa que, dados dos observadores X y Y, y un par de fotones idénticos, si el observador X obtiene noticia de que un fotón percibido está asociado a la trayectoria A, puede decir con seguridad que el observador Y también tendrá noticia de que el otro fotón aparejado estará asociado con seguridad, también a la trayectoria A. Esto se debe, no a que se haya dado una interacción instantánea entre los dos fotones, sino a que desde su surgimiento, ambos fotones comparten la misma propiedad prefijada objetivamente. Hasta aquí no existe nada que transgreda el principio de localidad. Ahora bien, asúmase también que ésta máquina produce los pares de fotones al azar con carácter de equiprobabilidad, esto es, un tercio de las veces producirá un par de fotones asociados a la trayectoria A, otro tercio de las veces un par de fotones asociados a la trayectoria B, y otro tercio asociado a la trayectoria C. Por último, supóngase

que el par de observadores X y Y, posee cada uno un dispositivo de detección de la trayectoria de los fotones y que ambos observadores se encuentran lo suficientemente alejados como para asegurar que no interactúen entre sí. El dispositivo con que cuentan puede ser preparado de tal modo que se espere la detección del fotón en la trayectoria A, B, o C, colocando una palanca en tres posiciones respectivas a, b o c; de tal modo que si espera que el fotón que va a medir se encuentre asociado a la trayectoria A, deberá poner la palanca en la posición a, si espera que el fotón esté asociado a la trayectoria B, deberá poner la palanca en la posición b y, si espera que se encuentre asociado a la trayectoria c, deberá poner la palanca en la posición c. Si cualquiera de los observadores pone la palanca, por ejemplo en la posición b, y el fotón que va a medir se encuentra efectivamente asociado a la trayectoria B, entonces se encenderá un bombillo verde que dará noticia de la correspondencia entre la trayectoria del fotón y la posición de la palanca preparada por el observador; si la palanca se prepara en la posición b, pero el electrón que va a medir se encuentra asociado a cualquiera de las dos otras trayectorias posibles, A o C, entonces se encenderá un bombillo rojo que indicará la no-correspondencia entre la trayectoria del fotón y la preparación de la palanca. Lo mismo sucederá cuando se prepare la palanca en cualquiera de las otras dos posiciones, si existe correspondencia entre la posición de la palanca y la trayectoria del fotón, se encenderá la luz verde, y si no existe tal correspondencia, se encenderá la luz roja.

Supóngase ahora que los observadores X y Y posicionan la palanca de sus respectivos detectores en la misma dirección y que la máquina productora de fotones arroja aleatoriamente millones de pares de fotones. Sépase además que los observadores se encuentran incomunicados, por lo que no saben cuál posición de la palanca del detector elegirá su compañero esperando detectar la trayectoria del fotón en una y otra dirección. Pues bien, aun así, es posible establecer un promedio en el que ambos observadores coincidirán. Nótese que son 9 las posibles combinaciones en las posiciones de las palancas que el par de

observadores pueden elegir: a y a, a y b, a y c; b y a, b y b, b y c; c y a, c y b o c y c. Como es natural, cuando ambos observadores coincidan en la posición que eligen para las palancas de sus detectores, ambos obtendrán el mismo resultado. Sin embargo también existen casos en los que ambos observadores obtendrán el mismo resultado (luz roja) a pesar de que no hayan puesto la palanca en la misma dirección. Por ejemplo, cuando el par de fotones está asociado a la trayectoria A, y los observadores X y Y, ponen respectivamente las palancas de sus detectores en las posiciones b y c respectivamente, ambos observarán encenderse la luz roja. Y así, si se trata de estipular el número de veces en que los observadores obtendrán el mismo resultado, tal número de veces será, en éste caso, 5, o sea 5 de 9. Lo mismo sucederá para los fotones asociados a las trayectorias B y C; los observadores coincidirán en sus resultados 5 de 9 veces. Aun cuando la máquina que produce fotones, produjera una cierta clase de fotones “extraños”, por ejemplo que se estuvieran en susceptibilidad de adquirir dos trayectorias, A y B, B y C o A y C, se obtendrían los mismos resultados, si se repite el experimento un número considerable de millones de veces; los observadores X y Y siempre coincidirían al menos 5 de 9 veces en el mismo color de la luz encendida. Esto muestra que existe un límite mínimo de coincidencia que resulta imposible de atravesar.

Tal es el razonamiento que Bell logró formalizar en su teorema: el de que existen unas desigualdades supuestamente inquebrantables y capaces de ser corroboradas experimentalmente. Sin embargo, al llevar este razonamiento al laboratorio, tratando de medir también otras propiedades de ciertos pares de partículas entrelazadas, como el espín, se comprobó que dichas desigualdades eran transgredidas. Dichas cantidades mínimas de coincidencia pueden, según las experimentaciones, ser menores que las prefijadas por las desigualdades de Bell. Tomando el mismo ejemplo anterior, se obtendría la transgresión del mínimo de 5 por 9 coincidencias en los resultados, supongamos 4,5 de 9 o 4 de 9. Ahora bien, si dichas desigualdades son transgredidas, se desprende una conclusión que se va al menos en contra de uno de los presupuestos que habían sido estipulados

por Bell como punto de partida: el de que existe una realidad objetiva con sus propiedades definidas o el de que tal realidad objetiva está caracterizada por el principio de localidad. Dicho de otra manera, o no existe una realidad objetiva con variables ocultas que determinen el devenir de los procesos cuánticos, o la realidad objetiva de los mismos está caracterizada por la no-localidad, esto es, admite la interacción instantánea o a velocidades mayores a la de la luz entre dos partículas, aún a distancias astronómicas. De, esta manera, si las propiedades de los sistemas cuánticos no se determinan en la medición sino que les son objetivamente inherentes, entonces debe mantenerse el límite prefijado por las desigualdades de Bell. Pero esto no es así, las desigualdades son transgredidas. Ahora, el teorema de Bell insta un mínimo experimental del que ninguna teoría simultáneamente realista y local se puede salir; pero como tal límite es rebasado experimentalmente, entonces ninguna teoría realista y local puede explicar esos experimentos, de lo que se concluye que cualquier interpretación de la física cuántica debe abandonar o bien el carácter objetivista que supone la existencia de parámetros ocultos, o bien debe abandonar el principio de localidad; ambas cosas resultan incompatibles, puesto que si existiera una realidad objetiva local, debería haber una coincidencia mínima que no exceda el límite prefijado por las desigualdades de Bell. Tomando el ejemplo anterior, si existiera una realidad objetiva y local, aunque contenga variables ocultas, debería haber una coincidencia mínima de 5 veces por cada 9, lo cual no sucede experimentalmente.

Los adelantos de John S. Bell constituyeron un hito revolucionario que permitió avanzar en el debate interpretativo con respecto al carácter objetivo, local y determinista en la física cuántica. Su teorema ayudó a estipular que la física cuántica no podía contener a su vez variables ocultas objetivas y ser simultáneamente local. Alain Aspect (1947) fue quién llevó a cabo las pruebas experimentales que conllevaron en 1983 a la demostración de la transgresión de las desigualdades de Bell, transgresión que demostró a su vez la no-localidad de la realidad cuántica. Recuérdese que EPR habían sostenido de manera tajante el

principio de localidad, rechazando con la misma contundencia la posibilidad de “misteriosas acciones a distancia”; pues bien, gracias a los avances de Bell y Aspect se confirmó la no-localidad del universo al nivel de las partículas subatómicas. En el mundo cuántico, los objetos ultramicroscópicos parecen intercambiar información a velocidades superiores a la de la luz por medio de conexiones que demuestran que dos partículas emitidas simultáneamente en un experimento deben ser consideradas como un único sistema entrelazado; como un sistema físico que se expresa por medio de una única función de onda. Esto sirvió además para profundizar en el conocimiento del fenómeno conocido como entrelazamiento cuántico, una realidad que EPR habían concebido hipotéticamente para demostrar la supuesta incoherencia de la interpretación de Copenhague y la incompletud de la física cuántica, sobre la base de que tal fenómeno implicaba el resquebrajamiento de la localidad. Resulta, pues, paradójico que el argumento de no-localidad que EPR habían esgrimido contra la interpretación de Copenhague y contra la física cuántica en general, haya sido corroborado en contra de los mismos EPR para plantear la necesidad ineludible de incorporar la no-localidad en los procesos cuánticos.

Después de los decisivos planteamientos de Bell y de las corroboraciones experimentales de Aspect, David Bohm incorporó en su interpretación de variables ocultas el principio de no-localidad, algo que no había considerado inicialmente. Si bien la interpretación de Bohm es causal y determinista, a la luz de la demostración de la no-localidad, se plantea la cuestión de que las acciones causales pueden sucederse de manera instantánea o a velocidades más rápidas que las de la luz, lo cual implica que la noción misma de causalidad necesita ser reconfigurada pues normalmente se concebía que entre causa y efecto debía existir un lapso en el tiempo en el cual tal vinculación pudiera sucederse.

De acuerdo con Bohm, las partículas subatómicas se comportan como puntos materiales cuya dinámica se despliega en virtud del vector de estado, el cual

representa a la onda piloto que guía la trayectoria de dichas partículas. Ahora bien, las partículas se encuentran interrelacionadas con otras, mediadas por un principio no-local que puede reconfigurar su comportamiento instantáneamente, de tal manera que al verse afectada una de las partículas constitutivas de un sistema cuántico, la onda piloto queda también modificada instantáneamente. Recuérdese que la mecánica de Bohm toma los sistemas cuánticos como sistemas de partículas cuya dinámica se describe a través de la función de onda y la ecuación de Schrödinger. Sin embargo, en contra de la interpretación de Copenhague, según Bohm, la función de onda no constituye una descripción completa del sistema. Tal descripción necesita complementarse, según Bohm, por las posiciones de las partículas que evolucionan de acuerdo a ciertas condiciones de orientación, las cuales crean un vínculo entre las velocidades de las partículas con su función de onda. De esta manera, los sistemas de partículas ostentan una evolución determinística cuya orientación está gobernada por la función de onda, que cumple el papel de onda piloto o guía. Para llevar a cabo esto, algo que resultaba imposible en la perspectiva de Copenhague, Bohm, agregó una microestructura complementaria al formalismo de la física cuántica, sin lo cual hubiera sido imposible lograr una descripción determinista de la evolución de los sistemas ultramicroscópicos. De esta manera, y en alusión a la microestructura de variables ocultas, “la información complementaria, esto es, la que se requiere para completar la teoría, es suministrada por la posición de las partículas (vía potencial cuántico) que evolucionan de acuerdo a la condición de orientación, que depende de la distribución de velocidades expresadas en términos de la función de onda: la onda piloto”¹¹³, agregándose que dicha información complementaria puede corresponder a parámetros desconocidos o variables ocultas que pueden interactuar con el sistema a distancia y de manera instantánea, en virtud de la no-localidad asumida en esta interpretación. “En otras palabras, en esta versión, la evolución del ensamble está coreografiada, por así decirlo, por la función de onda que guía a las partículas en sus trayectorias deterministas. De tal forma que la

¹¹³ CALA y ESLAVA. Op. cit., p. 132.

descripción estadística-tal como pensaba Einstein-estaría forzada por nuestra ignorancia de las condiciones iniciales precisas de los ensambles de microsistemas y por las dificultades para controlar dichas condiciones”¹¹⁴. De acuerdo con esto, se trata fundamentalmente de una limitación epistémica estipulada por la gran complejidad de la naturaleza de los sistemas cuánticos, en los cuales, la no-localidad, la influencia de factores que introducen casualidad y contingencia y que impiden una absoluta predictibilidad, dado que la naturaleza misma no se encuentra rígidamente fijada por patrones absolutamente regulares, sino sujeta a las posibles variaciones provocadas por parámetros ocultos que le otorgan un carácter probabilístico ineludible. Vale la pena mencionar además que la interpretación de Bohm es empíricamente equivalente a la interpretación de Copenhague, esto es, conduce a las mismas predicciones sobre los resultados de las mediciones cuánticas que la interpretación estándar, “debido a que comparte en buena medida-su aparato formal, es decir, comparte un conjunto de ecuaciones y unas reglas operativas para producir predicciones contrastables con experimentos”¹¹⁵. Sin embargo, esta interpretación niega la asunción indeterminista de la interpretación de Copenhague y su presupuesto de que la mecánica cuántica no dice nada sobre el mundo hasta que se llevan a cabo mediciones.

Hay que señalar que la interpretación de Bohm, además de recoger los presupuestos de de Broglie, de reinterpretar la ecuación de onda de Schrödinger y de incorporar la no-localidad, se sustenta también en la noción de orden implicado. Para Bohm, es imposible desarticular la estructura de la realidad cuántica de la estructura del resto del universo; existe para este científico una organicidad que caracteriza al universo como un todo y, si bien existen niveles de múltiple profundidad en la estructura del cosmos, también existen unas correlaciones específicas entre los mismos. Para Bohm existen diferentes niveles y

¹¹⁴ Ibid., p. 133.

¹¹⁵ Ibid., p. 121.

configuraciones del orden en el universo y puede darse el caso de que existan órdenes complejos y sutiles que no se encuentren esencialmente relacionados con el carácter de predictibilidad. En la realidad cuántica existiría, por ejemplo, una microestructura subyacente o un nivel inferior de existencia conformado por variables dinámicas ocultas no-locales las cuales, en conjunto con los parámetros observables, constituyen en su conjunto el orden implicado en los procesos cuánticos. Ya se aludió como las variables ocultas no locales completarían la función dada por la ecuación de onda fijando las trayectorias de las partículas y restaurando el determinismo. Podría afirmarse que la perspectiva de Bohm constituye una visión holista en la cual la esfera cuántica de la realidad se constituye como uno de los niveles del orden total implicado por la naturaleza en su conjunto; en consonancia con esto, nos dice el propio Bohm:

En estos estudios quedó claro que incluso el sistema de un solo cuerpo tiene una característica no mecánica, en el sentido en que este y su entorno se tienen que entender como un todo indivisible, en el que los análisis normales clásicos del sistema más entorno, considerados como separados y externos, ya no se pueden aplicar. La relación de las partes depende crucialmente del estado del todo, de tal manera, que no se puede expresar solamente en términos de las propiedades de las partes. De hecho las partes se organizan de forma tal que confluyen en el todo¹¹⁶.

Y así, en la versión de Bohm, nociones como las de no-localidad y probabilidad objetiva hacen parte del sustrato conceptual a partir del cual se deben reconfigurar la causalidad y el determinismo. Favio Cala y Edgar Eslava adhiriéndose a la interpretación de Bohm de la mecánica cuántica, dicen al respecto que “Se trata de una ontología explícitamente holística, no-local, que sin embargo recupera la imagen esencial, sembrada desde la tradición de la filosofía mecanicista, de que los fenómenos naturales, y en particular el mundo físico, debe reducirse a

¹¹⁶ Citado por WOODS, Alan y GRANT, Ted. Razón y revolución: filosofía marxista y ciencia moderna. Madrid: Casa Vieja, 1995. p. 98.

procesos cuya inteligibilidad está soportada por las categorías de materia y movimiento”¹¹⁷. Aun así, el determinismo no puede ser concebido de una manera idéntica a la mecanicista de Laplace; la naturaleza no funciona de una manera simple y mecánica, la probabilidad ocupa un lugar central en los procesos y se entrelaza con el determinismo no-local para constituir el complejo entretejido causal en el que se encuentran inmersos todos los procesos físicos.

d) Interpretación de estado relativo, multiverso o de muchos mundos

Esta interpretación fue planteada inicialmente por Hugh Everett (1930-1982) a mediados de la década de 1950 y posteriormente desarrollada por otros científicos como Bryce DeWitt (1923-2004). Esta interpretación se conoce con varios nombres, *“interpretación de estado relativo”, “interpretación multiverso”, “interpretación de muchos mundos”, “interpretación de los mundos múltiples”,* simplemente por sus iniciales *“IMM”*, u otras denominaciones afines. Lo fundamental de esta interpretación es que aborda la cuestión de que, a pesar de que los sistemas cuánticos se conciben formalmente como superposiciones de vectores de estado, en la realidad se da el caso de que sólo se presenta un resultado del proceso de medición de cada variable en particular, aunque presumiblemente suceda que se da sólo uno de los resultados probables del estado superpuesto en una de las dimensiones del universo, pero en realidad todas las posibilidades acaecen en diferentes dimensiones o mundos paralelos que se ramifican de acuerdo a la cantidad de estados probables aparentemente superpuestos. Esta interpretación se concibió para intentar dar solución al problema de la medición cuántica que desde la interpretación de Copenhague se había planteado.

La interpretación de estado relativo comparte con la interpretación de Copenhague el supuesto de que la física cuántica constituye una teoría completa, pero se

¹¹⁷ CALA y ESLAVA. Op. cit., p.137.

diferencia de la misma en su consideración de que el colapso de la función de onda constituye un resultado innecesario del formalismo de la teoría, debido a que en la interpretación de Copenhague se considera incorrectamente que los observadores desempeñan un papel definitorio en el proceder dinámico de los sistemas ultramicroscópicos. También se aparta de la interpretación de Copenhague al considerar que la función de onda corresponde a una entidad objetivamente real. De hecho, Everett sostuvo que el universo en su totalidad debe ser comprendido como un sistema cerrado que evoluciona de manera determinista en virtud de la ecuación de onda de Schrödinger. De esta manera, la interpretación de Everett elimina la partición realizada entre observador y sistema observado por la interpretación de Copenhague, declarando que el observador es una parte constitutiva del universo concebido como un todo. Sin embargo, agrega que cada resultado posible de toda medición tiene una existencia real, pero que el ser humano se encuentra limitado en un mundo en el cual sólo puede ser percibida una única posibilidad de todas las múltiples que se producen, cada una en una dimensión alterna del universo. La noción de “*estado relativo*” hace referencia a cada una de las posibilidades realizadas en una de las múltiples dimensiones del universo que coexisten sin que interactúen entre sí y sin que puedan ser objeto de evidencia por parte de los seres humanos.

En esta interpretación se asume además que los estados de los subsistemas de un sistema físico compuesto no pueden ser independientes del estado de la totalidad del sistema compuesto, o sea que resulta imposible sostener que un subsistema específico se encuentre en un estado definido independientemente del sistema total al cual pertenece y se encuentra indisolublemente articulado. Así, cada estado de cada subsistema se considera como un estado relativo del conjunto del sistema compuesto. “Cada observación crea un nuevo par de sistemas correlacionados: un subsistema observador/objeto observado y un

subsistema consistente en el resto del universo”¹¹⁸. En la interpretación de Everett, se supone que el observador, al ubicarse frente la superposición de estados del sistema que pretende investigar, entra también en una superposición de estados correspondiente a la del sistema en cuestión, imposibilitándose para distinguir y diferenciar sus estados independientes después de que la observación se ha dado. El observador se ubica, pues, en un mundo en el que sólo puede percibirse uno de los múltiples estados que se presentan. Hugh Everett resume esto diciendo que:

llegamos así a la siguiente imagen: durante toda una secuencia de procesos de observación hay un solo sistema físico que representa al observador, pero no existe un estado único del observador. Sin embargo, existe una representación en términos de una superposición cuyos miembros contienen, cada uno, un estado definido para el observador y un correspondiente estado del sistema. Así, con cada observación (o interacción) sucesiva, el estado del observador <<se ramifica>> en una serie de diferentes estados. Cada rama representa un resultado diferente de la medición y el correspondiente estado propio para el sistema objeto. Todas las ramas existen simultáneamente en la superposición después de cualquier secuencia de observadores¹¹⁹.

Al plantearse en la interpretación de estado relativo o mundos múltiples que la dinámica de los estados cuánticos superpuestos se desdobra en universos ramificados en los que hace efectiva cada una de las diferentes posibilidades encerradas, se plantea que de hecho, la superposición de estados se mantiene pero con uno sólo de los posibles estados hecho efectivo y perceptible en cada ramificación de los universos. Pero decir que la superposición de estados se mantiene con cada una de las posibilidades realizada en cada una de las múltiples dimensiones que existen simultáneamente como partes integrantes del multiverso, equivale a decir que la misma superposición de estados no existe, dado que cada

¹¹⁸ Ibid., p. 36.

¹¹⁹ CALA y ESLAVA. Op. cit., p. 37

estado propio sólo tiene realidad en una única dimensión alterna del multiverso, ya que nunca es el caso de que varios estados propios se encuentren coexistiendo en una misma dimensión del multiverso. Así, tomando como ejemplo el caso del gato de Schrödinger, tenemos que el gato no se encuentra en una superposición de estados propios sino que, el universo se desdobra en dos, cada uno de los cuales contiene al gato vivo y al gato muerto con sus respectivos observadores conscientes del estado propio del sistema. Así, según esta interpretación se propone que “los diferentes términos de una superposición macroscópica deben interpretarse como describiendo una multiplicidad de mundos macroscópicos que, para todo fin práctico, no interaccionan entre sí. En otras palabras, que todos los posibles resultados cuánticos de hecho se obtienen pero cada uno de ellos en un mundo paralelo al resto”¹²⁰. Cabe resaltar que aunque la idea fundamental de las interpretaciones de estado relativo o de muchos mundos es la misma, se han planteado algunos matices con respecto a la manera cómo se produce la ramificación del universo en múltiples universos, cada uno de los cuales contiene realizada una de las múltiples posibilidades del estado supuestamente superpuesto. Estos matices van desde la atribución al observador y el proceso de medición como el factor causal que produce la ramificación del universo en dimensiones correspondientes a los posibles resultados realizados, hasta la consideración de que dicha multiplicidad se produce como resultado de la interacción entre los sistemas cuánticos con su entorno, de modo que es la decoherencia la causa de la ramificación del universo en múltiples mundos en los que se realizan todos y cada uno de los resultados posibles. La decoherencia se concibe como el proceso mediante el cual se da el tránsito de lo cuántico a lo clásico o, en otras palabras, de lo ultramicroscópico a lo macroscópico. En el caso del experimento mental del gato de Schrödinger sucede que la interacción de las partículas constitutivas del gato con su entorno podrían llegar a provocar una decoherencia mediante la cual la combinación de gato vivo/gato muerto" dejaría de ser coherente transformándose en un estado macroscópico definido.

¹²⁰ OKON. Op. cit., p.22.

En cualquier caso, en la interpretación de estado relativo o de muchos mundos, el determinismo se mantiene puesto que el universo en su totalidad, así como sus subsistemas constitutivos, evoluciona por completo en virtud de la función de onda determinada por la ecuación de Schrödinger. Al atribuírsele en esta interpretación un nuevo carácter al colapso de estado, desaparece la aleatoriedad mediante la cual, en la interpretación de Copenhague, los estados superpuestos de los sistemas cuánticos se decantaban de manera indeterminista por uno de los estados distribuidos previamente entre un rango definido de probabilidades. Al adquirir un nuevo significado en esta interpretación, el colapso de la función de onda ya no se asemeja a un juego de dados que se decide probabilísticamente por uno sólo de los resultados sino que todos los resultados posibles se realizan, cada uno en una de las múltiples ramificaciones del universo. Se podría decir que, al materializarse todos los posibles estados en los cuales puede desplegarse un sistema cuántico en el curso de su dinámica, el colapso queda anulado, pero esto resulta impreciso, puesto que el colapso de la función de onda queda anulado sólo en tanto a que deja de ser una salida abrupta a la superposición de estados, pero no queda anulado en tanto a que de hecho se produce la disolución de los estados enmarañados por medio de la ramificación simultánea en universos paralelos. Sin embargo, el propósito fundamental de esta interpretación no se planteó en términos de la solución al problema del dilema determinismo/indeterminismo, sino como una alternativa para resolver el problema de la medición cuántica. Sin embargo, como el problema ha suscitado la indecisión de muchos teóricos acerca de la bifurcación determinismo/indeterminismo se ha encontrado relacionada con la interpretación del problema de la medición cuántica, resulta importante mencionar aquí los presupuestos de ésta interpretación y lo que los mismos agregan en torno al problema del determinismo. De esto último, hay que reiterarse que lo importante a tenerse en cuenta en el marco de esta interpretación es que al adquirir un nuevo significado el problema del colapso de la función de onda o colapso de estado, se elimina la supuesta aleatoriedad indeterminista que, según la interpretación de Copenhague e interpretaciones cercanas a ella concebían

como un rasgo inherente a la salida abrupta de los sistemas cuánticos de la superposición de estados, las interpretaciones en términos de estado relativo o múltiples mundos “pretenden conciliar el hecho de que el vector de estado es completo, y que este siempre evoluciona de acuerdo con la ecuación de Schrödinger, con el hecho de que nos parece que todas las mediciones siempre terminan con resultados definidos”¹²¹.

e) Interpretación de colapso objetivo o realismo probabilista

En realidad el realismo probabilista o interpretación de colapso objetivo encierra un conjunto de interpretaciones que con matices casi imperceptibles convergen en los mismos puntos esenciales. La formulación más sobresaliente de éste tipo es la que han desarrollado los científicos Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini y Tulio Weber, perspectiva que se conoce como la interpretación Ghirardi-Rimini-Weber o, más abreviadamente, interpretación GRW por las iniciales de sus autores. La teoría GRW representa un ejemplo de interpretación estocástica como una alternativa que se contrapone a la interpretación estándar en pro de un modelo no-lineal de evolución de los sistemas cuánticos. Según la interpretación GRW, varias de las dificultades suscitadas a la luz de la interpretación de Copenhague se encuentran relacionadas con el principio de evolución lineal que provoca la generación de explicaciones radicalmente distintas para sistemas físicos cuánticos y clásicos. Para solventar ésta problemática, GRW sugieren la posibilidad de realizar una unificación de los niveles ultramicroscópico y macroscópico por medio de una reinterpretación no-lineal capaz de abarcar ambas clases de sistemas físicos.

Detrás de esto subyace la consideración de que es posible modificar la física cuántica estándar por medio de la inclusión de elementos estocásticos en la ecuación de Schrödinger que sirvan para evitar la superposición lineal de eventos

¹²¹ Ibid., p. 22.

distantes en el tiempo y en el espacio, pero conservando al mismo tiempo las consecuencias que se producen en los microsistemas locales según la física cuántica estándar. Los elementos estocásticos se introducen aquí para que se hagan posibles las probabilidades aleatorias definidas en la representación de la dinámica determinista descrita por la función de onda de sistemas de partículas individuales. Se trata, pues de un intento reinterprelativo que plantea la necesidad de “modificar la ecuación dinámica de la teoría estándar con la inclusión de términos aleatorios. Esto con el fin de dar cuenta del comportamiento de sistemas microscópicos y macroscópicos por medio de una única ley, en particular, el objetivo es explicar de manera unificada, y sin hacer referencia a mediciones y observadores, tanto el comportamiento cuántico de los sistemas microscópicos como la ausencia de superposiciones en el mundo macroscópico”¹²².

La interpretación de GRW concibe la necesidad de realizar algunas modificaciones de la dinámica de los procesos cuánticos en la versión estándar por medio de la incorporación de aspectos espontáneos que se suscitan a nivel microscópico y que ostentan la tendencia a eliminar las superposiciones en la medida en que se da el tránsito hacia los sistemas macroscópicos. En esta interpretación el colapso de la función de onda se realiza de manera objetiva e independientemente de cualquier proceso de medición; se trata de un proceso espontáneo mediante el cual, los sistemas están definiéndose en distintos grados por uno de los estados contenidos entre su rango definido de probabilidades, es de subrayarse que éste colapso objetivo y espontáneo acaece de manera aleatoria, sin que exista una predisposición a realizarse por uno u otro de los estados probables contenidos. “Según GRW, en general, las partículas se comportan según lo prescrito por la teoría cuántica habitual. Pero, de vez en cuando, raramente, sus vectores de estado sufren procesos de colapso espontáneo. Estos procesos son aleatorios y, en principio, imprevisibles y el valor sobre el que se producen es determinado por

¹²² Ibid., p. 20.

las probabilidades usuales asociadas al propio vector de estado”¹²³. Esto significa que, habitualmente, los sistemas cuánticos se encuentran en una casi permanente superposición de estados pero que, además, se suscitan colapsos de estado espontáneos aunque suceden muy raramente y siempre de manera aleatoria. Ciertamente, tales colapsos pueden también ser inducidos por medio de, por ejemplo, el acto de medición, pero tal constituye un caso particular forzado de colapso de estado; lo natural es que éstos se produzcan objetiva, espontánea y aleatoriamente, aunque sea en el orden de periodos bastante prolongados de tiempo. “Si, por ejemplo, como sugieren GRW, una partícula concreta sufre un colapso cada 10^{16} segundos (o sea, cada 100 millones de años), los efectos del proceso serán prácticamente indetectables y la teoría cuántica mantiene por completo su aplicabilidad: superposición de estados, evolución según la ecuación de Schrödinger, etc.”¹²⁴. Pero la situación se torna muy diferente cuando se trata de un sistema macroscópico pues éste se encuentra “formado por un número de partículas del orden del número de Avogadro: 10^{24} partículas. Por tanto, en su interior, alguna partícula sufrirá uno de estos colapsos cada 10^{-8} segundos, en promedio. Cada vez que esto ocurre, colapsa el vector de estado de todo el sistema que, por tanto, se mantiene perfectamente definido desde un punto de vista macroscópico”¹²⁵. En todo caso, los sistemas físicos, cuánticos y clásicos, son todos partícipes del mismo colapso objetivo y espontáneo, sólo que el orden y la frecuencia en que dichos colapsos se suscitan incrementan proporcionalmente cuando incrementa el número de partículas involucradas en los sistemas físicos, siendo más frecuente en la medida en que el sistema aumenta en la escala de tamaño hacia lo macroscópico. De esta manera, la interpretación de Ghirardi, Rimini y Weber

propone que cada partícula elemental sufre, en tiempos aleatorios distribuidos con una cierta frecuencia, procesos repentinos que la localizan (o colapsan) en

¹²³ JUAN, Antonio Aparicio. La teoría cuántica y sus interpretaciones: un enfoque filosófico realista. Madrid: Revista Laguna, No. 13. 2003. p. 63.

¹²⁴ Ibid., p. 63.

¹²⁵ Ibid., p. 63.

posiciones apropiadas. Para entender cómo esto ayuda en la supresión de superposiciones macroscópicas, notamos que la frecuencia con la que ocurren las localizaciones espontáneas es sumamente pequeña, de manera que cada partícula elemental sufre muy pocos de estos colapsos. Sin embargo, la frecuencia de localizaciones crece con el número de partículas involucradas así que éstos colapsos hacen que los objetos macroscópicos no duren mucho tiempo deslocalizados (de hecho, para objetos macroscópicos, este tiempo resulta mucho menor que la escala en la que ocurren los fenómenos humanos de percepción)¹²⁶.

De esta manera, la cuestión fundamental de la interpretación de colapso objetivo o realismo probabilista propuesta por GRW consiste en renunciar al carácter determinista unitario planteado por la ecuación de Schrödinger, reinterpretando ésta misma sobre la base de un principio de evolución estocástica que introduzca elementos aleatorios en la representación de la evolución dinámica de los procesos cuánticos individuales. GRW proponen reemplazar el principio de evolución determinista por uno de carácter no determinista en virtud del cual sea posible concebir un trasfondo aleatorio como contexto en medio del cual se produce la dinámica de los sistemas físicos de manera no mecánica. La conclusión de GRW puede ser resumida en éste fragmento de su autoría:

es posible introducir de manera consistente una modificación a la mecánica cuántica estándar que deja las cosas inalteradas para los objetos microscópicos, mientras que, para los objetos macroscópicos, transforma la mecánica cuántica en una mecánica estocástica en un estado de fase que exhibe características clásicas. Por supuesto, la incertidumbre no se elimina sino, en algún sentido, se aumenta. Sin embargo el grado de estocasticidad es bastante pequeño y resulta ser compatible con nuestra experiencia del comportamiento de los objetos macroscópicos¹²⁷.

¹²⁶ OKON, Op. cit., p.21.

¹²⁷ Citado CALA y ESLAVA. Op. cit., p. 84.

Si analizamos con detenimiento la interpretación propuesta por GRW, nos percatamos de que su propósito fundamental reside en explicar satisfactoriamente el problema del colapso de la función de onda, procurando unificar los sistemas cuánticos y clásicos y, eliminando de paso, las dificultades que se suscitan en el tránsito de lo microscópico a lo macroscópico. El problema de la medida no se trata en ésta interpretación de manera explícita pero se infiere de ella que el colapso supuestamente provocado mediante el proceso de medición constituye un caso especial pero no el único, contrariamente a la interpretación de Copenhague, que produce el colapso de estado. Esto la diferencia de la interpretación estándar y le permite erigir una perspectiva realista que habla acerca de cómo se encuentra constituido el mundo, algo que a la luz de la interpretación ortodoxa representa un sinsentido metafísico. También se distancia bastante de la interpretación de múltiples mundos en el sentido de que el colapso siempre produce resultados definidos que, aunque se dan por medio de procesos aleatorios, se decantan por un resultado unívoco; con esto se elimina la propuesta incontrastable empíricamente de que todos los estados posibles se realizan en ramificaciones simultáneas de universos paralelos en cada uno de los cuales se concreta cada uno de los resultados posibles. Finalmente, aunque comparte con la interpretación de Bohm el carácter realista y objetivo de los procesos que describe, se distancia bastante en el punto de la asunción de que dichos procesos son objetivamente deterministas, admitiendo, en virtud de su naturaleza puramente aleatoria, la introducción del indeterminismo. Se trata de una teoría relativamente reciente que deberá desarrollarse para evaluar la viabilidad de sus postulados, en la medida en que sean coherentes con la práctica investigativa concerniente a los procesos físicos que se suscitan en la realidad objetiva.

f) *Breves apuntes sobre otros acercamientos interpretativos al problema del determinismo en la física cuántica*

Por lo que se ha podido ver después de este esbozo de las interpretaciones más sobresalientes sobre la física cuántica, el problema del determinismo asume un carácter bastante variado, aunque en algunas interpretaciones, como en la de Bohm, resulta más patente el esfuerzo por hacer énfasis en el tratamiento directo de ésta cuestión en particular; en la mayoría de las demás interpretaciones, con diferentes matices, el problema del determinismo se trata en segundo plano o de manera implícita, por lo cual ha sido menester realizar ciertas inferencias y conjeturas para detectar lo que cada una de las interpretaciones ha sugerido al respecto. En seguida se muestran otros acercamientos que, aunque no constituyen interpretaciones sistematizadas propiamente dichas, si agregan algo de contenido adicional que puede servir para dar luces a una aproximación un poco más cercana hacia un análisis del problema del determinismo en la física cuántica, lo que se configura como la cuestión medular del presente trabajo.

En primera instancia, Olimpia Lombardi, sugiere que para solucionar ciertas de las paradojas que se suscitan al comparar los niveles físicos clásico y cuántico resulta pertinente apelar a un principio que ella denomina como *“pluralismo ontológico”* y que concibe una realidad estratificada en donde cada estrato presenta una ontología relativamente distinta pero completamente objetiva. La autora afirma que tal presupuesto se encuentra fundamentado en el realismo internalista que Hillary Putnam desarrolló durante los años 80 y que surgió como contraposición al realismo externalista o ingenuo que supone que los objetos de la conciencia son totalmente independientes de nuestro conocimiento. En lugar de ello, sobre la base de una interpretación kantiana que supone que conocemos no las cosas en sí mismas sino el resultado de nuestra experiencia sobre las mismas, se propone que los objetos de nuestro conocimiento no son totalmente independientes de nuestros esquemas conceptuales. Mientras que para el realismo externalista, la

única forma de conocer consiste en dar una descripción verdadera y completa del mundo y que la verdad reside en la correspondencia entre lenguaje y realidad, desde la perspectiva del realismo internalista se supone que con base en los esquemas conceptuales, la mente humana “desmenuza” el mundo con base en un determinado sistema de categorías que sirve para referirse de manera descriptiva y explicativa al mundo objetivo. Desde esta segunda perspectiva, se asume que dichos esquemas conceptuales no son absolutos sino que, por el contrario, plantean una relatividad conceptual que, a su vez, entraña el hecho de que existe un pluralismo ontológico, que como se dijo, contempla una realidad estratificada con ontologías distintas pero igualmente objetivas. En medio de ésta interpretación epistemológica, Olimpia Lombardi sugiere que “determinismo e indeterminismo pueden coexistir en un mismo sistema con el mismo grado de objetividad, en la medida en que son propiedades de ontologías diferentes pero igualmente reales”¹²⁸. Aclarando que ésta autora comprende indeterminismo, no como la ausencia de causas específicas que determinen el devenir de los procesos de la realidad sino como el hecho de que el porvenir de un proceso específico, para éste caso físico-cuántico, no se encuentra estrictamente fijado por el presente si no que alberga un cierto margen de indefinición que abre la posibilidad para que la novedad inesperada pueda acaecer. Dicho esto, para la autora, el carácter determinista o indeterminista es relativo al marco teórico adoptado y, a su vez, éste mismo dará razón del pluralismo ontológico que se constituye como el rasgo característico de la multiplicidad de la realidad objetiva.

Por su parte, Sebastián Fortín¹²⁹ se pregunta si el mundo cuántico es real e inherentemente indeterminista o si debe buscarse una teoría determinista subyacente en relación con la cual la mecánica cuántica se puede formular en

¹²⁸ LOMBARDI, Olimpia y LÓPEZ, Cristian. Ergodicidad y determinismo. Aparece en la recopilación de ensayos: “Fronteras del determinismo científico”. Madrid: Editorial Biblioteca Nueva, 2015. p. 54.

¹²⁹ Para una mejor comprensión de la postura de éste autor revisar el ensayo Determinismo e indeterminismo en mecánica cuántica que aparece en la recopilación de ensayos “Fronteras del determinismo científico”. Madrid: Editorial Biblioteca Nueva, 2015.

términos de promedio estadístico. Procede el autor a observar cómo, al menos en el sentido tradicional, la teoría cuántica no puede ser considerada determinista. Analiza en seguida por qué si la ecuación de Schrödinger fija unívocamente su estado en instantes posteriores la mecánica cuántica es tradicionalmente como una teoría indeterminista. Ante esto, responde el autor que el postulado del colapso de la función de onda introduce un elemento aleatorio que hace que los procesos cuánticos se vuelvan indeterministas. Sin embargo expone algunas alternativas para salvaguardar el determinismo. Como punto de partida para emprender dicho propósito analiza que el determinismo ontológico debe contar con dos condiciones necesarias: a) que exista un único estado en un instante específico que corresponda necesariamente a un estado anterior y, b) que tales estados determinen unívocamente todas las propiedades físicas del universo en los instantes respectivos. Después de exponer tales condiciones, Fortín analiza el hecho de que la física cuántica cumple con la primera pero no con la segunda condición. Ahora bien, amparándose en los presupuestos de otro autor, John Earman (1986), sugiere que el determinismo no exige que las variables físicas posean valores puntuales sino tan sólo en cierto grado; la evolución determinista puede darse en la sucesión de magnitudes con valores interválicos. Esto plantea dos implicaciones fundamentales: por un lado renunciar al tradicional supuesto según el cual un cuerpo ocupa una única posición en cada instante y, por otro lado, acoger una noción determinista ajena a la tradicional. Por otro lado, sustentándose también en Hughes (1989), sugiere que la categoría ontológica clásica de propiedad es inaplicable al contexto de los sistemas cuánticos debe reemplazarse por la categoría de *"latencia"*. Si una partícula se encuentra en una superposición de estados, no corresponde a ninguno de sus autoestados, no posee entonces propiedad alguna correspondiente sino que posee una latencia; una disposición objetiva de manifestar un valor específico con cierto grado de probabilidad. Con base en esto, Fortín, plantea que la evolución de las latencias se encontraría regida por la ecuación de Schrödinger, con lo cual se recobraría el determinismo ontológico en la física cuántica, pero concebido no ya sobre la base

de la sucesión unívoca de propiedades, sino sobre la base de la sucesión unívoca de latencias. Así, según este autor, es una exigencia prioritaria reconsiderar profundamente ciertos supuestos ontológicos fundamentales con lo que se incidiría decisivamente sobre las conclusiones acerca del determinismo ontológico, exigiéndose incluso una revisión del propio concepto de determinismo.

Finalmente, para completar estas breves observaciones adicionales sobre el problema del determinismo en la física cuántica, Leonardo Vanni¹³⁰ sugiere que la física cuántica evidentemente no responde a un determinismo laplaceano que determine unívocamente los estados sucesivos de un sistema para todos los instantes futuros sobre la base de un estado inicial dado. Mientras que en la mecánica clásica, todas las variables de un sistema se encuentran determinadas por un estado inicial, en la mecánica cuántica no. La diferencia fundamental entre ambas reside en la particular relación que existe entre el estado y las variables dinámicas en ambos casos. En la mecánica clásica, según este autor, todas las propiedades pueden considerarse en función de un estado específico pero contrariamente, si bien un estado cuántico evoluciona de un modo determinista, esto resulta insuficiente para determinar todos los valores de las variables. Esto se debería a que estas últimas no son función del estado, como en el caso clásico; sus valores no quedan determinados por el estado. Cada estado cuántico sólo puede decirnos la probabilidad de que una variable del sistema adquiriera un cierto valor. Así, Vanni, concluye que, en el nivel del estado la mecánica cuántica describe una evolución determinista, pero que, en el nivel de las propiedades o variables, la misma describe una evolución indeterminista. Para éste autor, la comprensión de la mecánica cuántica es una cuestión abierta al debate, no es posible asumir posturas a la ligera que nos decanten por los senderos de la trivialidad. Citando a Juan Arana, hay que cerrar éste breve esbozo afirmando que

¹³⁰ Para una mejor comprensión de la postura de éste autor revisar el ensayo Historias en mecánica cuántica que aparece en la recopilación de ensayos "Fronteras del determinismo científico". Madrid: Editorial Biblioteca Nueva, 2015.

“El contingentismo radical, el determinismo reduccionista, la separación tajante de diversos ámbitos sometidos a principios y leyes desconectados, son ejemplos de opciones teóricas que probablemente hayan quedado desbancadas para siempre por obra y gracia de esta teoría”¹³¹.

Con estos apuntes adicionales se cierra la aproximación hacia un análisis del determinismo en la física cuántica. Por lo que se podido mostrar, el tema del determinismo adquiere un carácter bastante problemático a la luz de los desarrollos crecientes de la física cuántica. Las múltiples posiciones frente a esta cuestión ponen en evidencia la complejidad del tema y la necesidad de realizar un abordaje que considere la mayor cantidad de perspectivas en aras de aportar en el enriquecimiento de la discusión, que como es notable, se extiende hasta nuestros días. En lo que resta del presente trabajo se presentarán algunas conclusiones en las que se expone la posición del autor con respecto a la cuestión que constituye el tema de la presente investigación.

¹³¹ Citado por VANNEY, Claudia. Indeterminismo cuántico y pluralismo cognoscitivo, Fronteras del determinismo científico. Madrid: Editorial Biblioteca Nueva, 2015. p. 133.

CONCLUSIONES

Como se ha podido ver, la física cuántica entraña un conjunto de fenómenos que desafían a la intuición fundamentada, en la mayoría de los seres humanos, sobre la base de la experiencia común en el mundo macroscópico. También para quienes han estudiado los procesos físicos asentando sus nociones sobre la mecánica clásica, resultan un tanto hirientes las paradojas que los procesos cuánticos suscitan en el mundo ultramicroscópico. Cuestiones como la discontinuidad cuántica, las propiedades simultáneamente corpusculares y ondulatorias de la materia, el carácter probabilístico de los procesos físico-cuánticos, la imposibilidad establecer simultáneamente y con exactitud ciertos pares de propiedades de los sistemas físico-cuánticos, la no-localidad o interacción instantánea y a distancia, la superposición de estados, el colapso de la función de onda, la perturbación no despreciable que se produce como resultado del acto de medición, etc. Todas estas situaciones que se develan cuando la ciencia se introduce en las íntimas profundidades de la materia ultramicroscópica han servido para que la ciencia reconsidere la forma en cómo se encuentra configurado el universo en su micro-nivel. Como se ha planteado, el determinismo se ve inmerso en este contexto, siendo necesario reconsiderar su naturaleza para constatar si le es posible sostenerse en la misma manera cómo en la física clásica, si se ve derrumbado totalmente, o si necesita reconfigurarse y replantearse a la luz de las situaciones aludidas que se evidencian en la escala ultramicroscópica de la materia. A continuación se presentan las conclusiones derivadas como resultado de éste trabajo:

- a) El determinismo rígido o laplaceano ha sido definitivamente refutado en el contexto de la física cuántica*

Después de este recorrido a través del mundo cuántico, lo primero que hay que señalar es la inevitable bancarrota del determinismo rígido que, simplificando, se

ha denominado como determinismo laplaceano. El filósofo estadounidense William James compartió esta visión del determinismo y la sintetizó de la siguiente manera:

¿Qué profesa el determinismo? Profesa que aquellas partes del universo ya expuestas absolutamente nombran y decretan lo que han de ser las otras partes. El futuro no tiene posibilidades ambiguas ocultas en sus entrañas: la parte que llamamos presente es compatible con sólo una totalidad. Es imposible otro comportamiento futuro que el que ha sido fijado desde la eternidad. El todo está en todas y cada una de las partes, y las fusiona en una unidad absoluta, un bloque de hierro, en el que no puede equivocación ni ambigüedad¹³².

Tal convicción científica se había consolidado como una conclusión perfectamente razonable de los avances de la física clásica, sobre todo gracias, al potencial predictivo que se había posibilitado sobre la base del avance de dicho campo de la ciencia. Sin embargo, después de examinar la complejidad intrínseca de la naturaleza en su escala ultramicroscópica, se hizo explícito que esa forma de determinismo Laplaceano constituye una exagerada simplificación del orden que se manifiesta en la naturaleza. Tal forma de determinismo que afirmaba una conexión unívoca entre los procesos de la naturaleza y que se desplegaban de manera inevitable, como si la historia del devenir de la misma se encontrara fijado inmutablemente de antemano, resultó insuficiente en un nivel más profundo de la realidad en el que, por ejemplo, la probabilidad no se concibe como un síntoma de las limitaciones epistémicas del ser humano sino como un rasgo inherente al comportamiento de la naturaleza.

La probabilidad objetiva de los procesos cuánticos implica que éstos mismos encierran cierto grado de contingencia, haciendo que los mismos resulten en cierto grado impredecibles; no sólo para la mente humana, sino también en el sentido de

¹³² Citado por CAPEC, Milic. El impacto filosófico de la física contemporánea. Madrid: Editorial Tecnos, 1961. p. 337.

que los mismos no ostentan un comportamiento rígido, unívoco e inmutablemente regular; de tal suerte que resulta imposible establecer en ellos un patrón absoluto de orden, con lo que se plantea la necesidad ineludible de aceptar que dichos procesos no avanzan por la senda de lo estrictamente prefijado sino por la senda de la máxima probabilidad. En consonancia con esto, el principio o relaciones de incertidumbre planteadas por Heisenberg resaltan dicha indefinición esencial a la naturaleza cuántica, estipulando la imposibilidad de que las condiciones iniciales de un sistema físico ultra-microscópico se encuentren rígidamente establecidas. Consecuentemente con esto, tampoco las condiciones futuras del mismo sistema se encontrarán rígidamente establecidas, resquebrajándose la máxima nuclear del determinismo laplaceano de que el estado presente de un sistema físico se encuentra unívocamente determinado por un estado anterior, y prefija consecuentemente y de manera inevitable un único estado ulterior. La naturaleza idealizada desde el tamiz laplaceano se concibe en términos de una inquebrantable uniformidad en la que las mismas causas preceden siempre a los mismos efectos y en la que toda la historia pasada y futura de la misma se encuentra unida por un hilo irrompible que le atribuye una coherencia pre-escrita desde el inicio de los tiempos; coherencia inmutable que no alberga lugar alguno para transgredir los márgenes de esa regularidad prefijada, excluyéndose al mismo tiempo cualquier indicio de novedad. La física cuántica, por el contrario, parece caracterizarse por el “quizás” o por el “puede ser”, introduciendo una apertura a la posibilidad de ocurrencia de fenómenos no estipulados rígidamente por la naturaleza, posibilidad que va en contravía de los presupuestos laplaceanos de que la naturaleza avanza siempre uniformemente.

No obstante el claro resquebrajamiento del determinismo laplaceano a la luz de la física cuántica, es necesario señalar que también el mismo resulta insuficiente para los procesos estudiados por la física clásica; incluso para los procesos macroscópicos resulta ser una exagerada simplificación. Esto se debe a que dichos procesos tampoco excluyen una apertura a la contingencia y a la

inexactitud. Si bien, es posible advertir en ellos un grado más acentuado de regularidad que en los procesos cuánticos, no por ello es posible inferir que los procesos macroscópicos ostenten siempre un advenimiento idéntico. Cada proceso de la realidad macroscópica o microscópica posee unos rasgos singulares e irrepetibles de tal manera que siempre van a existir ciertas variaciones, por más insignificantes que parezcan, en los resultados que detentan como producto de la inferencias de una o varias acciones causales determinadas. Cuando cambian las condiciones en las que actúa una causa, esto se evidenciará en unos cambios en sus efectos, aunque dichas variaciones sean despreciables experimentalmente y, en rasgos generales, se mantenga la regularidad. Ahora bien, ya se mostró en el aparato referente al “*determinismo y los desarrollos en la física clásica*”, cómo incluso procesos que estudia la física clásica en los campos de la teoría cinética de gases y en la termodinámica, pueden describir comportamientos aleatorios, casuales o probabilísticos; puesto que la regularidad simplista propia del determinismo rígido no puede dimanar de sistemas físicos más complejos como los gases o los procesos térmicos. Ya en estos campos se habían comenzado a abrir grietas en la concepción determinista rígida expresada en el mecanicismo laplaceano, de lo cual se sigue que resulta erróneo afirmar que, si bien en la física cuántica tal concepción resulta errónea, la misma sí se cumple estrictamente en los procesos que investiga la física clásica.

b) Existe la posibilidad de sostener el determinismo en términos no laplaceanos

Como se dijo, la bancarrota de este tipo de concepción determinista del mundo se hizo más patente a la luz de las investigaciones en el campo de la física cuántica, puesto que en los procesos ultra-microscópicos, la probabilidad objetiva resulta ser un rasgo más acentuado de la realidad que motiva a la ciencia a sacudirse de esa imagen inmutablemente regular que se había canonizado en la simplificación laplaceana. No obstante lo dicho, vale la pena preguntarse si el declive definitivo

del determinismo laplaceano excluye otras formas de determinismo; ¿es el determinismo laplaceano la única forma de determinismo posible? O, planteando la cuestión de otra manera, sería necesario indagar si el determinismo excluye la existencia de procesos casuales, contingentes, aleatorios o azarosos que representen una desviación de la regularidad general expresada en el condicionamiento objetivo de leyes causales; o, lo que es lo mismo, es necesario indagar si el carácter probabilístico, contingente, casual de ciertos procesos físicos son ajenos a cualquier indicio de regularidad y orden expresado en una trama natural determinada por patrones causales.

Cuando nos planteamos la cuestión del dilema del determinismo, es inevitable realizar tal contraposición entre determinación causal e indeterminación casual, pero en vistas de establecer las relaciones específicas entre determinismo y casualidad, para aproximarnos a la consideración de si es o no posible un determinismo en el que se contemple la probabilidad como un rasgo inherente a la naturaleza. Milic Capek examina esto en los siguientes términos: “o estas fluctuaciones son causadas, y entonces volvemos al determinismo clásico; o podemos decir que las cantidades energéticas microfísicas fluctúan espontáneamente, o sea, sin causa, alrededor de ciertos valores medios”¹³³. De esto se desprende el hecho de que la espontaneidad o casualidad constituye un proceso carente de causas; en el presente trabajo se considera que no, que un proceso casual (asociada la casualidad a términos afines como probabilidad, contingencia, aleatoriedad) no es un proceso acausado sino un proceso irregular imprevisto pero causado por factores que no dimanen de su propia esencia sino de causas externas que, por una u otra razón, llegan a converger en dicho proceso alterando la regularidad de su devenir. Capek sugiere que si adoptamos la primera perspectiva, absolutamente causal, nos encontraríamos frente a un rígido condicionamiento en el que todo ocurre por necesidad, un “necesitarismo” sin posibilidad de advenimiento de novedad alguna; por otra parte, si se aceptara

¹³³ Ibid., p. 329.

la segunda alternativa, completamente casualista, entonces se estaría defendiendo un “contingentismo” de un tipo casi milagroso, puesto que se estaría asumiendo que las fluctuaciones e irregularidades en los procesos microfísicos procederían sin causa, de la nada, porque sí.

Sin embargo, Capek, sugiere que ambas posiciones resultan insatisfactorias puesto que “tal indeterminismo absoluto, por más paradójico que parezca, es incompatible con la interpretación objetivista del principio de incertidumbre como el determinismo absoluto del tipo clásico”¹³⁴. Luego, resulta posible contemplar una tercera alternativa frente al dilema del determinismo en los procesos cuánticos. Ésta tercera alternativa residiría en una posición intermedia entre el determinismo intransigente y el contingentismo intransigente fundamentada sobre la base de la consideración de que la novedad casual es compatible con la influencia causal del pasado. Esto se explica en el hecho de que existen leyes objetivas que condicionan causalmente los procesos físicos pero, éstos mismos no poseen un futuro prefijado de manera inevitable por la injerencia de las mismas, puesto que “el único estatus que el futuro puede tener en el mundo dinámico es el de posibilidad o potencialidad; y la posibilidad...implica una auténtica ambigüedad de los sucesos aun no realizados”¹³⁵. Para éste autor, la posibilidad es una categoría fundamental del mundo dinámico y la disyunción entre posibilidad objetivamente existente o simplemente aparente nos plantea, en realidad, la elección entre un universo dinámico o estático respectivamente. De esta manera, asumir la existencia de la probabilidad objetiva estaría en pro de la asunción de un mundo dinámico que entraña el advenimiento de la novedad; las contingencias y casualidades van modificando la forma en cómo las leyes necesarias actúan, esto es, el carácter probabilístico de la realidad, concretado en las contingencia y casualidades que puedan acaecer, es el que va dando forma al proceder de los sucesos. Se trata de

¹³⁴ Ibid., p. 330.

¹³⁵ Ibid., 338.

una concepción en la que lo contingente y lo necesario, lo casual y lo determinista se encuentran inseparablemente imbricados.

Así, a juicio del autor del presente trabajo, la probabilidad de los procesos cuánticos no excluye su determinación causal. Si bien resulta contingente que un suceso cuántico se despliegue por una u otra de sus alternativas posibles, cada una asociada a un determinado grado de probabilidad, es necesario que lo haga inevitablemente y resolviéndose por una sola de ellas. Ahora bien, un proceso cuántico no se encuentra unívocamente determinado, esto es, puede decantarse por varias alternativas probables de realización, pero no por *cualquier* alternativa de realización, si no por una de las múltiples que contiene potencialmente; es decir que a cada proceso le corresponde un rango incierto de probabilidades pero no un rango de una cantidad infinita o absolutamente indefinida de probabilidades. Ahora bien, la contingencia y la aleatoriedad propia de la evolución multívoca de los procesos cuánticos encierran el hecho de que existe una conexión causal que a su vez implica una especificidad relativamente determinada. Esto se explica en virtud de la consideración de que el determinismo no es necesariamente algo rígido, predefinido con absoluta necesidad sino que el mismo se articula de diversas formas, de acuerdo a las contingencias inevitables que permiten que la acción de las leyes causales sea relativamente maleable y diversa dependiendo de las condiciones específicas en medio de las cuales obran dichas leyes. El determinismo no implica la univocidad de la causalidad; admite, por el contrario, una multivocidad y alberga la posibilidad de la aparición de novedades que no se encuentran prescritas en la historia física de la naturaleza de los procesos cuánticos. Siguiendo, lo planteado por Milic Capek:

En tal mundo presente, todo suceso presente es indudablemente causado, aunque no necesitado por su propio pasado. Pues mientras que no es todavía presente, su carácter específico sigue siendo inseguro por una simple razón: que es únicamente su cualidad presente la que crea su especificidad, o sea, pone fin a su

incertidumbre, eliminando todas las otras facetas posibles que no son compatibles con ella. Así, todo momento presente es, por su propia naturaleza, un acto de selección que termina con la vacilación de la realidad entre varias posibilidades¹³⁶.

Si se considera que el determinismo es un postulado por medio del cual se le atribuye un carácter universal a la causalidad, habría que agregar que la causalidad asume un carácter polimorfo para no caer en simplificaciones que impidan abordar el estudio de procesos de tanta complejidad como los que aparecen en la realidad física investigada por la física cuántica. Así, la causalidad al menos se bifurcaría en dos caracteres generales: una causalidad necesaria y una causalidad contingente. La primera sería un tipo de relación causal que, en determinadas condiciones objetivas, obraría de manera inevitable, excluyendo cualquier posibilidad de desviación a esa regularidad esencial que dimana del nexo específico. La segunda sería un tipo de causalidad que, debido a la multiplicidad de factores influyentes en las condiciones específicas en que obra, impiden un único despliegue hacia un único resultado, encerrando un número diverso pero no infinito de posibilidades reales hacia las cuales desplegarse. En este orden de ideas, la causalidad necesaria encerraría un carácter unívoco expresado en un nexo causal estable y, prácticamente inevitable; por su parte, la causalidad contingente, encierra un carácter multívoco expresado en un nexo causal relativamente inestable que no procede de manera inevitable hacia un único posible resultado sino hacia el resultado más probable distribuido entre un rango definido pero múltiple de probabilidades de ocurrencia.

El físico y filósofo Mario Bunge ha expresado ésta idea aunque con unos términos ligeramente diferentes. Sugiere que “la admisión del azar objetivo es una ampliación del determinismo para que no incluya únicamente las leyes causales, sino también las probabilísticas. El azar y la causalidad, lejos de ser incompatibles entre sí, pueden transformarse el uno en la otra y viceversa. Por ejemplo, la

¹³⁶ Ibid., p. 342.

mecánica cuántica recupera las leyes de la mecánica de partículas clásica como promedios”¹³⁷. En un afán por comprender las relaciones entre causalidad y azar, Mario Bunge ha investigado los fenómenos de la mecánica cuántica y ha llegado a la conclusión de que para no limitar la visión de los procesos físicos y caer en abordajes unilaterales que den versiones parciales y rígidas, es necesario concebir ambos aspectos, la causalidad y el azar como fenómenos constitutivos que se implican mutuamente y resultan totalmente inconcebibles el uno sin el otro. A la luz de éste tipo de abordaje filosófico, Mario Bunge asume una posición en pro del desarrollo de un determinismo más sofisticado que denomina como “probabilístico”, rechazando las interpretaciones indeterministas de la mecánica cuántica:

El determinismo causal dominó las ciencias casi sin disputa durante más de dos milenios, hasta la emergencia de la mecánica cuántica en 1925. Desde entonces ha tenido que luchar con el determinismo probabilístico, a menudo llamado de modo engañoso <<indeterminismo>>. Más aún, frecuentemente se afirma que la causalidad es un caso particular de la aleatoriedad, a saber cuándo las probabilidades involucradas son igual a la unidad. Sin embargo, se trata de un error: los conceptos de causalidad y azar son mutuamente irreductibles¹³⁸.

Esto es enfatizado nuevamente por el autor cuando sugiere que:

La MC es ciertamente estocástica y básicamente así, pero una teoría estocástica que implique leyes definidas concernientes a distribuciones de probabilidad no es indeterminista si no deja sitio para lo ilegal y/o creado de la nada. En resumen, nuestra versión de la MC es tan determinista como la mecánica clásica- sólo que no contemporiza con el determinismo laplaciano. Tampoco la doctrina ortodoxa es determinista: en efecto, si las probabilidades cuánticas son sólo grados de certidumbre, entonces nada puede inferirse de las cosas en sí. El indeterminismo

¹³⁷ BUNGE, Mario: A la caza de la realidad: la controversia sobre el realismo. Madrid: Gedisa Editorial, 2006. p. 150.

¹³⁸ Ibid., p. 136.

ontológico requiere una interpretación física (objetiva) de la probabilidad. Mas tan pronto como las probabilidades son objetivas y legales, el indeterminismo se evapora quedando el determinismo estocástico¹³⁹.

De cualquier manera, de acuerdo con lo anterior se concluye que no sólo es posible, sino necesario y razonable, desarrollar una noción de determinismo diferente a la que se había planteado desde la perspectiva laplaceana. El rígido determinismo laplaceano sólo admite la existencia de la causalidad necesaria planteando el devenir de los procesos físicos y del universo en general en términos de un carácter unívoco. No ha sido gratis que a tal forma de determinismo se le haya llegado a llamar fatalismo, puesto que el mundo procediera de esa manera, su destino estaría prefijado ineluctablemente sin posibilidad para que una novedad pueda aparecer en un futuro, que se consideraría preestablecido de manera absoluta. En dicha forma de determinismo no queda lugar para lo contingente, casual y lo probable; rasgos que a lo largo del presente trabajo se han ido mostrando como ineludibles en el contexto de la física cuántica y, aún en los procesos macroscópicos, aunque en una medida relativamente menor. Por lo tanto, resulta una conclusión acelerada afirmar que, porque en la física cuántica resulta insostenible el rígido determinismo laplaceano, entonces también resulta insostenible el determinismo en general y que, por lo tanto, haya que adoptar el indeterminismo de los procesos cuánticos y elevarlo al nivel de principio indiscutible. “El determinismo en física no se reduce a la forma que adopta en la física clásica. En comparación con la mecánica clásica, la mecánica cuántica refleja unos nexos más generales y más profundos. La ecuación ondulatoria, que coordina el estado del microobjeto en diferentes intervalos de tiempo, expresa el principio del determinismo en la mecánica cuántica”¹⁴⁰. El determinismo sólo afirma la universalidad de la causalidad pero no estipula que esta deba ser de una única manera; como se ha intentado mostrar, la

¹³⁹ BUNGE, Mario. Filosofía de la física. Barcelona: Ariel, 1978. p. 125.

¹⁴⁰ MELUJIN, S.; OMELIANOVSKY, M.; y KUTNETSOV, L. V.. Problemas filosóficos de la física contemporánea. México, D.F.: Grijalbo, 1969. p. 122.

determinación causal asume un carácter polimorfo que no se circunscribe a la unívoca manera en cómo le concebía en el marco de simplista determinismo laplaceano. Es un reto desarrollar las teorías de la causalidad para profundizar las múltiples maneras en como ésta se manifiesta para que así la ciencia y la filosofía puedan ir comprendiendo de una mejor manera cómo se encuentra articulado e interconectado el complejísimo entramado del universo.

c) No es lo mismo indeterminación que indeterminismo

Resulta fundamental distinguir la naturaleza de estas dos categorías para evitar confusión en los abordajes interpretativos que se hagan de los procesos de la realidad en general y de la física cuántica en particular. Mientras que la categoría de indeterminación hace referencia a la propiedad objetiva de la materia que se expresa en una indefinición relativa con respecto a la adquisición de un valor concreto por parte de una propiedad o magnitud dinámica, la categoría de indeterminismo alude a la carencia de determinación causal que produzca la aparición de un proceso específico, decantándose por afirmar la aparición absolutamente espontánea de algo, *ex nihilo*. La noción de indeterminación se encuentra asociada con aquellos rasgos del futuro de algún objeto real que aún no han llegado a ser, que se encuentran en potencialidad de ocurrir, es decir, que representan una posibilidad real de ocurrencia sin que los mismos lleguen aún a concretarse o a materializarse. De esta manera, las indeterminaciones se expresan muchas veces como un conjunto de posibilidades de las cuales sólo una puede llegar a ocurrir sin que esté rígidamente estipulado cuál de ellas llegue a materializarse.

Así, si un electrón se encuentra en una superposición de estados, de tal manera que contiene en sí mismo un conjunto de posibilidades de adquirir diferentes valores, supongamos para su momento, se dice que existe una indeterminación con respecto al valor del momento que llegará a adquirir en el curso de su

evolución temporal; podría adquirir 1, 2, 3, 4, o 5, supongamos, pero no está preestablecido que vaya a decantarse por uno de ellos con seguridad absoluta, la posibilidad de adquirir cada uno de esos valores se encuentra asociada a un determinado grado de probabilidad, pero hasta que no se resuelva por uno en específico, la cantidad del momento de dicho electrón estará caracterizada por una relativa indeterminación.

Por otro lado, el indeterminismo, como ya se aludió, se expresaría en el hecho de que un proceso o conjunto de procesos se encuentren fundamentalmente caracterizados por la acausalidad, esto es, que su comportamiento no dependa de causa alguna, o más aún: que en determinado segmento de la realidad o en el universo entero no existan leyes causales que determinen el surgimiento y la articulación regular de los procesos de la realidad. De esta manera, se puede considerar un indeterminismo concreto, un indeterminismo parcial, o un indeterminismo global o universal. En el primer caso se aceptaría que un proceso x de la realidad ha surgido espontáneamente sin encontrarse vinculado por un nexo genético que lo produzca desde un instante pasado o desde una latitud espacial determinada, como cuando se afirma que el hecho de que un electrón asuma uno u otro valor para alguna de sus propiedades es un proceso totalmente espontáneo y es absolutamente independiente de un nexo causal en virtud del cual se decante por la adquisición de uno y otro de los valores posibles para dicha propiedad. En el segundo caso se aceptaría que en determinados niveles de la realidad, supongamos en el nivel de la realidad subatómica, no funcionan las leyes causales, sino que todos los objetos pertenecientes a dicho nivel son absolutamente espontáneos y no requieren de vinculaciones causales que expliquen la razón por la cual proceden como proceden; así, por ejemplo, según el principio de complementariedad sostenido por la interpretación de Copenhague, la causalidad es un principio que se sostiene en la esfera clásica o macroscópica de la realidad pero que pierde su vigencia cuando se aplica a los procesos atómicos y subatómicos; se estaría, en tal caso, asumiendo un indeterminismo parcial,

relativo a un conjunto de procesos pertenecientes a un segmento específico de la realidad. Y, finalmente, en el caso más extremo, se sugeriría que el principio de causalidad es una ilusión o una hipótesis creada por la mente para procurar organizar la experiencia en virtud de patrones de regularidad sin que la misma posea una existencia real u objetiva. En este caso, se sostendría que nada en el mundo se encuentra interconectado causalmente, que sólo existen objetos y procesos que se suceden y coexisten sin que existan nexos genéticos por medio de los cuales se acepte que un proceso o un objeto ha sido producido por otro o que este mismo, al interactuar con otro u otros, produzca uno o varios efectos. En esta forma de indeterminismo global, nada en el mundo estaría determinado causalmente por nada, puesto que sólo existiría un catálogo de eventos desconectados, sólo unidos entre sí por la simultaneidad de su existencia en el espacio y por la transitoriedad de unos y otros a través del tiempo.

En todo caso, mientras que en la física cuántica es posible encontrar procesos y situaciones caracterizadas por la indeterminación resulta apresurado atribuirles el carácter de indeterminados. En virtud del carácter probabilístico de los procesos cuánticos, éstos mismos ostentan un grado de indeterminación en el sentido de que no se encuentran rígidamente definidos y entrañan un conjunto de posibilidades hacia las cuales desplegarse sin que tengan rígidamente establecido por cuál de ellas hacerlo. Así mismo, de acuerdo con el principio de incertidumbre, las partículas cuánticas no poseen valores rígidamente definidos de posición y momento, energía y tiempo, etc. pero eso no quiere decir que no contengan dichos valores aunque sea dentro de unos límites insuperables de indeterminación o indefinición. Por otra parte, no es adecuado afirmar que debido a esta indefinición relativa de los procesos cuánticos los mismos sean indeterminados causalmente, es decir, que sus cambios no sean producidos por causas específicas aunque no se conozcan cabalmente. Incluso, cuando se habla de que los procesos de medición producen el colapso de la función de onda y un cierto grado de perturbación sobre los sistemas medidos, se estaría aceptando que la

causa de esa perturbación sería la interacción del sistema medido con el dispositivo de medida, proceso mediante el cual, el segundo arroja cantidades específicas de energía al sistema medido, suficientes como para producir sobre él una perturbación considerable. Así mismo, lo que se suele concebir como una desintegración totalmente espontánea de un núcleo atómico específico, podría encontrar su causa en la inestabilidad del mismo, debida, a su vez, a la incompletud de electrones de valencia, es decir, de aquellos que se ubican en su último nivel de energía aunque, en realidad, “la física actual no conoce aún todas las causas que determinan la desintegración del núcleo atómico de un elemento radiactivo en cierto momento. Y esta insuficiencia de nuestros conocimientos, esta limitación teórica, es aprovechada para deslizar furtivamente la idea de que la desintegración radiactiva se produce sin causas”¹⁴¹.

Por otra parte, pero en el mismo orden de ideas, es posible encontrar una determinación causal a los saltos cuánticos de un nivel de energía menor a otro mayor que, aunque caracterizados por una discontinuidad que no tiene contrapartida en el mundo macroscópico, se producen a causa de la absorción de cuantos de energía; cuando un electrón absorbe un cuanto de energía reaparece sin atravesar puntos intermedios en un nivel cuantizado de mayor energía. Sin embargo aún resulta complicado establecer las causas que producen el proceso inverso, esto es, cuando un electrón en el interior del átomo realiza un salto cuántico que le lleva a reaparecer, sin pasar por puntos intermedios, en un nivel de menor energía. La física cuántica “no conoce aún todas las causas que determinan en el átomo el paso de un electrón de un estado de mayor energía a otro de menor energía y que va acompañado de la producción de una partícula de luz-fotón-, con emisión luminosa; por esta razón, la teoría no puede predecir el momento en que ha de producirse ese paso”¹⁴². Frente a esta indeterminación específica, científicos que han aportado trazas de conocimiento de

¹⁴¹ ROSENTAL, M.M. y STRAKS, G.M.. Categorías del materialismo dialéctico. México D.F.: Grijalbo S.A., 1958. p. 96.

¹⁴² *Ibid.*, p. 95.

inconmensurable valor científico se apresuran a aseverar que el indeterminismo es el rasgo esencial de los procesos cuánticos, confundiendo, por un lado, la indeterminación particular de nuestro conocimiento con respecto a las causas que determinan la ocurrencia de ciertos procesos con un indeterminismo connatural a los mismos y, por otro lado, extrapolando el carácter contingente e inestable de la regularidad atómica con una ausencia total de causas objetivas. Así, por ejemplo, tales insuficiencias en el conocimiento de las causas que determinan los procesos atómicos han llevado a que destacados científicos como N. Bohr afirmase que, en la física atómica, “nos hemos alejado del estudio causal de los fenómenos y que debemos atribuir al electrón interatómico, que al comienzo se halla en cierto estado estable, una elección posterior libre, en modo alguno condicionada, entre las diversas vías que se le ofrecen para pasar a otros estados estables”¹⁴³. O, también como el mismo Paul Dirac ha sostenido con base en los procesos cuánticos sin contrapartida en la física clásica que el indeterminismo debe ser elevado a la categoría de principio, puesto que el hecho de que no podamos atribuir ciertos nexos causales en los procesos cuánticos implica, el desconocimiento científico de los mismos, sino la ausencia objetiva de tales nexos. Para Dirac, el indeterminismo resulta ser, en consonancia con el acceso empírico directo limitado a los procesos cuánticos, que resulta perfectamente loable que el determinismo deba ser retirado definitivamente de las representaciones que la ciencia proporciona del mundo ultramicroscópico: “No hay que creer que la ausencia del determinismo en la teoría cuántica sea algo que debamos deplorar. El determinismo debe hallarse forzosamente ausente de una teoría racional y definitiva de la estructura de la materia”¹⁴⁴.

De esta manera, varias de las aseveraciones que sostienen el fin del determinismo en la física cuántica se basan en una falta de diferenciación entre determinación y determinismo. Siendo la primera la falta de concreción epistémica y ontológica con

¹⁴³ Ibid., p. 95.

¹⁴⁴ DIRAC, P,A,M.. Fundamentos de la física cuántica. Barcelona: Ariel, 1937. p. 12.

respecto a ciertas propiedades de los procesos atómicos y subatómicos y, siendo el primero, la ausencia objetiva de nexos causales en el contexto de los mismos procesos. Sin embargo, aunque la naturaleza “oculte” la coherencia con que proceden ciertos sistemas de la realidad, no implica la ausencia de la misma, sino la incapacidad humana para desentrañarla; por otra parte, la ciencia proporciona siempre respuestas aproximadas, insuficientes para agotar el conocimiento relativo a algo en concreto, en este caso, los nexos causales inmanentes a los procesos cuánticos, de modo que su papel es el de una constante profundización en las entrañas de la realidad que, muy probablemente, la llevarán a dar explicaciones un poco más satisfactorias. “La física actual descubre los aspectos peculiares, específicos, de las relaciones causales entre los fenómenos, que se producen en el átomo, en el núcleo atómico y en el curso del movimiento de algunas partículas...y pone al descubierto asimismo las diferencias existentes entre esas relaciones y los nexos causales ordinarios, propios de los grandes cuerpos, ya sea en escala terrestre o en escala cósmica”¹⁴⁵, por lo cual, una actitud científica más adecuada consiste en asumir que las profundidades del mundo cuántico encierran una gran complejidad al ser abordadas por la ciencia debido a que sus procesos no tienen contrapartida con el mundo en el que estamos acostumbrados a desenvolvernó; de esto se sigue que el proceso de exploración de las profundidades ultramicroscópicas de la materia consiste en un largo camino en el que poco a poco se irá esclareciendo la coherencia de los complejísimos nexos que proporcionan el orden específico de la estructura de la materia. En tal camino es necesario tener en cuenta la diferenciación entre la indeterminación específica de ciertos fenómenos del indeterminismo esencial de los mismos. Mientras que la primera resulta razonable, incluso en procesos que no son cuánticos, el segundo resulta una exagerada extrapolación de la primera que niega la posibilidad de establecer causas y, por lo tanto, concatenaciones necesarias y coherentes para concebir la relativa regularidad implícita en todos los procesos del cosmos, en todas sus escalas.

¹⁴⁵ ROSENAL y STRAKS. Op. cit., p. 95.

d) En una visión determinista del mundo es incorrecto crear bifurcaciones absolutas entre lo contingente o casual y lo necesario

Como se ha dicho, el determinismo es una categoría que sirve para designar el condicionamiento causal de todos y cada uno de los procesos de la realidad, incluidos los referentes a la escala ultramicroscópica de la materia. Ahora bien, para evitar simplificaciones que conlleven a un abordaje unilateral, superficial e insuficiente del tema del determinismo es fundamental, como ya se había señalado asumir el carácter polimorfo de las relaciones causales, evitando, por ejemplo, identificar lo causal con lo necesario o lo estrictamente prefijado y excluyendo de dicha descripción aquello que se refiere a lo casual o contingente. En este sentido, lo causal, que se constituye como el núcleo medular del determinismo debe contemplar las relaciones existentes entre lo casual y lo necesario y no sólo abordar la causalidad en términos unilaterales de lo casual o lo necesario. Dichas disyuntivas absolutas han llevado a crear una versión rígida del determinismo como la de Laplace en la que todo proceso de la realidad acaece inevitablemente, por necesidad, negando la importancia de las contingencias azarosas del cuadro general del universo. Por otro lado, en el ámbito de la física cuántica se ha llegado a la negación del determinismo sobre la base de que en los procesos microfísicos prevalece un aspecto contingente o casual que se expresa en el carácter probabilístico de dichos procesos y que se hace más evidente cuando la ciencia se ve movida a acudir a métodos estadísticos para estudiarlos. Se podría decir que después de los descubrimientos desconcertantes de la física cuántica se comenzó a negar la existencia del determinismo en los procesos microfísicos a causa de que se tenía la impresión de que la única forma concebible de determinismo era aquella forma en la que la causalidad se concebía como lo necesario y lo casual o contingente como aquello que no es causado o carece de causas y, en todo caso, un determinismo en el que se contemplaba lo necesario y lo casual o contingente como dos aspectos irreconciliablemente opuestos y sin nexos específicos ni relaciones comunes entre ambos. De esto se

deducía que como el determinismo lleva implícita la marca de una causalidad netamente necesaria, entonces en la física cuántica, al ser inevitables las causalidades y contingencias expresadas en el comportamiento probabilístico de los sistemas cuánticos, entonces, en dichos sistemas resulta obsoleto el determinismo. Éste ha sido, en parte, uno de los obstáculos que ha impedido desarrollar una interpretación determinista de los procesos cuánticos: la contraposición absoluta entre lo necesario y lo casual o contingente.

Ahora bien hay que considerar lo siguiente: ni lo causal debe identificarse con lo absolutamente necesario, ni lo casual debe identificarse con lo carente de causas. En primer lugar, lo causal, como se ha señalado, puede expresarse en términos necesaristas o contingentes. Una causa, en determinadas condiciones, determina obligatoriamente, esto es, necesariamente, la aparición de un efecto correspondiente. La causalidad expresa un nexo generalmente regular y estable entre los procesos, de modo que a las mismas causas les suceden los mismos efectos; pero esto sucede sí y solo sí, actúan sobre las mismas condiciones dadas. Si las condiciones dadas cambian, también cambiará la relación causal de tal modo que los efectos correspondientes a las causas sufrirán modificaciones justificadas por dichas diferencias acaecidas en las condiciones sobre las cuales actúa una determinada relación causal. Esto quiere decir que el carácter necesario del nexo causal es relativo puesto que no puede esperarse que un efecto siga inevitablemente a una causa si cambian las condiciones sobre las que obra ésta última. Esto se puede expresar sencillamente con ejemplos del mundo macroscópico: jalar el gatillo de un rifle cargado producirá inevitablemente un disparo en todos los casos en los que la pólvora posea unos grados de humedad adecuados; pero si la pólvora se encuentra mojada, el disparo ya no se producirá por más que se jale el gatillo. En las condiciones adecuadas de temperatura, humedad e iluminación, una determinada semilla germinará, pero si ciertas contingencias del clima o la aparición de una plaga aparecen, ésta semilla no germinará, por más que las condiciones de temperatura, humedad e iluminación

sean las adecuadas. Ejemplos como éstos pueden ser extrapolados a vastos dominios de la realidad, y todos ellos nos llevarán a inferir el carácter relativo de la causalidad como acaecimiento necesario. La causalidad se expresa solamente como necesidad en ciertas condiciones específicas, de modo que no es posible atribuirle un carácter absoluto sino relativo.

De lo anterior se desprende el hecho de que la causalidad también debe ser considerada en su carácter contingente, en el sentido de que la misma no excluye la posibilidad de salirse de los causes regulares que la llevan a producir generalmente un mismo efecto, ya que, de nuevo, en tanto cambien las condiciones, ésta puede producir uno u otro efecto. Un efecto correspondiente a una causa puede como no puede producirse, dependiendo de las condiciones. Y también, un efecto correspondiente a una causa puede ser uno como puede ser otro, dependiendo de las condiciones igualmente. De esto se infiere que las condiciones obran como causas secundarias que modifican el curso general de los nexos causales, determinando que los mismos ostenten tanto un carácter de regularidad como de irregularidad. Las mismas causas producen generalmente los mismos efectos, pero esto no excluye que tal cosa no suceda puesto que la aparición de causas secundarias expresadas en la variabilidad de las condiciones conllevan a que dicha regularidad ostentada no sea absoluta sino condicionada por otros factores que no dimanen de la esencia del nexo causal en específico sino que se constituyen como aspectos exteriores o ajenos a la esencia de dicho nexo causal. En otras palabras, la regularidad de los nexos causales no excluye la posibilidad de la aparición de aspectos casuales o contingentes que, actuando como causas secundarias, marcan cierta irregularidad en la sucesión de las causas y los efectos. Así, “Por consiguiente, una relación causal puede surgir como una aproximación estadística del comportamiento medio de un conjunto de procesos que sufren fluctuaciones al azar en sus factores determinantes. Y, análogamente, una relación de probabilidad puede surgir también como una aproximación estadística de los efectos de un gran número de vinculaciones

causales, cuando estas se mantienen dentro de una independencia relativa sumamente grande”¹⁴⁶.

De acuerdo con esto, es posible también inferir que lo casual o contingente (categorías asociadas a lo azaroso o aleatorio) no debe concebirse como lo carente de causa. Lo casual es, como se dijo, aquello que no dimana de la esencia de un proceso pero que sin embargo se configura como una causa imprevista que proviene del exterior del proceso y que marca su rebasamiento de los límites que determinan su regularidad. Es erróneo considerar lo casual o lo contingente como algo que carece de fundamento causal; “la casualidad es lo que tiene su fundamento y su causa fuera de sí, en otra cosa, no en sí mismo, ni en la esencia de los fenómenos de los procesos, de los hechos mismos, ni de las cosas; es lo que se desprende de los nexos accidentales o externos, no de los nexos y vínculos internos, y lo que, en virtud de ello puede ser o no ser, lo que puede suceder así o de otro modo”¹⁴⁷. Así, por ejemplo, una granizada puede llegar a frenar totalmente el crecimiento de una planta hasta llevarla a su destrucción. En tal caso, el encuentro entre la planta y dicha tempestad, que ha sido producida por unas determinadas causas, posee un carácter casual con respecto a las leyes biológicas que determinan causalmente y, en principio necesariamente, de la planta. En el ámbito de la física cuántica, para un electrón es posible que adquiera uno u otro entre un rango de valores probables, pero el hecho de que se decante por uno de ellos es inevitable y está causalmente determinado, aunque no se conozca cabalmente cuáles son las causas que determinan que su superposición inicial se resuelva por una u otra de las posibilidades. De esto se desprende que es inadecuado considerar que, en el seno del determinismo, lo necesario y lo casual o contingente sean aspectos desligados, puesto que cada uno de dichos aspectos participa de el rasgo esencial del determinismo: la causalidad. “las causas de la necesidad radican en los nexos profundos, esenciales, de un proceso

¹⁴⁶ GORTARI, Eli de. *Dialéctica de la física*. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, Dirección General de Publicaciones, 1964. p. 224.

¹⁴⁷ *Ibíd.*, p. 129.

o acontecimiento dados. Las causas de la casualidad radican, en cambio, en los nexos externos, no esenciales de los procesos, de los acontecimientos¹⁴⁸. De esta manera la interdependencia entre casualidad y necesidad expresa el carácter polimorfo de la causalidad y, por consiguiente, el carácter complejo del determinismo. Por lo tanto, al formar una unidad indisoluble de complejas y mutuas conexiones, lo necesario y lo casual se imbrican de tal forma que no es posible concebir causalidad como necesidad pura ya que ésta se manifiesta concretamente en situaciones caracterizadas por contingencias y casualidades inevitables, propias del carácter relativamente singular y único de todo proceso; y, por otra parte, tampoco es posible concebir la causalidad en términos de casualidad pura o contingencia pura, puesto que éstas mismas encuentran su fundamento causal en lo externo y accidental pero, además, ostentan un cierto orden que las liga, en mayor o menor grado a la necesidad; "... lo que se afirma necesario se compone de toda una serie de meras casualidades y lo que se cree fortuito no es más que la forma detrás de la cual se esconde la necesidad, y así sucesivamente"¹⁴⁹. Si todo acontecimiento causal fuera necesario, la absoluta totalidad de la existencia estaría dada de una manera inevitable y prefijada hasta adquirir connotaciones místicas; y si todo acontecimiento fuera casual o contingente, no existiría ningún orden ni regularidad y el mundo estaría inmerso en un caos sin que ningún objeto ni ningún proceso o acontecimiento encuentren un nexo que le ligue a otros objetos, procesos o acontecimientos, perdiendo absolutamente la coherencia que les articule al vasto y complejo entramado universal. Elí de Gortari expresa esto de la siguiente manera, evitando un abordaje unilateral del determinismo en el que sólo se tenga en cuenta la importancia de lo necesario o de lo casual:

La conexión causal y las contingencias azarosas representan dos aspectos necesarios e indisolubles de todos los conjuntos de procesos; de tal modo que la

¹⁴⁸ *Ibíd.*, p. 130.

¹⁴⁹ ENGELS, Friedrich. *Ludwig Feuerbach y el fin de la filosofía clásica alemana*. Moscú: Gospolitizdat, 1955. p. 18.

consideración de uno de esos aspectos corresponde a una aproximación que no se puede mantener ilimitadamente, sino que debe ser condicionada y complementada por el otro aspecto. Es más, la infinitud cualitativa del universo y su organización en niveles diferentes, suministra un marco en el cual encajan congruentemente las contingencias azarosas y las conexiones causales, como dos manifestaciones inseparables de todos los conjuntos de procesos existentes¹⁵⁰.

Y esto aplica también para los procesos cuánticos; procesos en los cuales la dinámica de sus sistemas detenta, más explícitamente que en los procesos macroscópicos, un carácter casual o contingente, expresado en el carácter probabilístico del comportamiento de dichas entidades ultramicroscópicas. Recordemos, para fortalecer este argumento lo ya citado desde las reflexiones de Juan Arana: “El contingentismo radical, el determinismo reduccionista, la separación tajante de diversos ámbitos sometidos a principios y leyes desconectados, son ejemplos de opciones teóricas que probablemente hayan quedado desbancadas para siempre por obra y gracia de esta teoría”¹⁵¹. De aquí que, para el abordaje interpretativo en torno al determinismo en la física cuántica resulte una condición ineludible marcar una diferencia entre lo necesario y lo casual, pero también los nexos entre ellos que los convierten en aspectos indisolubles de la realidad.

e) Es necesario replantear la noción de causalidad en la física cuántica

Aunque ya se ha advertido ésta cuestión, es necesario agregar algunas consideraciones adicionales con respecto a la causalidad en la física cuántica. La causalidad es la expresión particularizada del determinismo y, la misma no puede ser abordada simplistamente como en el determinismo de antaño, planteado en

¹⁵⁰ GORTARI. Op. cit., p. 225.

¹⁵¹ Citado por VANNEY, Claudia. Indeterminismo cuántico y pluralismo cognoscitivo, Fronteras del determinismo científico. Madrid: Editorial Biblioteca Nueva, 2015. p. 133.

términos laplaceanos. A la luz de la física cuántica es necesario reconfigurar ésta noción para que la misma resulte adecuada para el estudio determinista de los procesos ultramicroscópicos. Ya Bohr había señalado que la física cuántica “implica una renuncia frente a la coordinación espacio-temporal causal de los procesos atómicos”¹⁵² planteando el carácter totalmente obsoleto de la noción de causalidad para abordar los procesos cuánticos. Sin embargo, como se intentará mostrar, esa renuncia a la coordinación causal se produce sólo con respecto a la noción de causalidad clásicamente considerada, pero no a una noción más general de causalidad que se puede y se necesita elaborar, enriqueciéndola con los nuevos conocimientos científicos que la física cuántica ha proporcionado en el curso de su desarrollos. Como se verá, la física cuántica, en lugar de refutar la causalidad, posibilita y hace evidente un abordaje más profundo de la misma.

Recordemos que la noción clásica de causalidad está caracterizada fundamentalmente por tres características. Uno de los rasgos esenciales de ésta noción sería que todo nexo causal implica una sucesión en el tiempo en la cual primero se presenta la causa y posteriormente su correspondiente efecto. La causa es el fenómeno que provoca la aparición del otro, el efecto, y siempre le *precede*; el efecto es el fenómeno provocado por el otro u otros y siempre le *sucede*. Esto significa que entre causa y efecto siempre existe un lapso en el tiempo en el que el efecto aparece después de la causa que lo genera. Ahora bien, aunque según esta concepción, toda relación causal implica una sucesión temporal, no toda sucesión de fenómenos en el tiempo implica una relación causal pues, por ejemplo, el día sigue a la noche y la noche al día, pero ninguno es la causa del otro; ambos encuentran su fundamento causal en el movimiento de rotación de la tierra alrededor de su eje. El segundo de los rasgos de la noción clásica de causalidad implica que entre la causa y el efecto no existe tan sólo una sucesión temporal sino también un nexo *genético*, en el sentido de que la causa

¹⁵² Citado por CALA y ESLAVA, Op. cit., p. 17.

genera, produce al efecto, le da origen. Y, finalmente, el tercer rasgo de la noción clásica de causalidad se expresa en que existe un carácter *necesario* que vincula a la causa con el efecto; esto quiere decir que las mismas causas, reproducidas en las mismas condiciones, producen siempre los mismos efectos.

Pues bien, a la luz de la física cuántica, se mostrará que al menos dos de esas características necesitan ser reconsideradas. Por un lado la primera y, por otro la tercera. Reconózcase que la segunda característica planteada en la noción clásica de causalidad es la esencia misma de la causalidad puesto que ésta reside en que una causa *genera* o *da origen* al efecto; no sólo le precede en el tiempo, sino que la misma es la que lo produce, presentándose un nexo profundo que vincula a la causa con el efecto y que se expresa en el hecho de que ningún efecto puede aparecer sin la causa correspondiente que lo provoca. Dicho esto, hay que señalar por qué los otros dos rasgos de la noción clásica de causalidad necesitan ser planteados en el contexto de la física cuántica.

Para analizar por qué el carácter de sucesión temporal entre causa y efecto se pone en cuestión en la física cuántica recuérdese algo. John S. Bell y luego Alain Aspect y otros demostraron que cualquier teoría cuántica de variables ocultas tenía que abandonar el principio de localidad. Esto significa, como ya se había señalado, que dentro de los procesos cuánticos existen interacciones que se producen de manera instantánea y, muchas veces, a distancias astronómicas. Esto implica que los cambios experimentados por una partícula en un rincón del universo pueden tener repercusiones inmediatas o instantáneas en otra partícula existente en otro rincón del universo suficientemente distante. De acuerdo con esto, las interacciones pueden producirse a velocidades mayores a la de la luz, transgrediéndose por lo tanto, la teoría especial de la relatividad. Esta propiedad de las interacciones en los procesos cuánticos se manifiesta en el fenómeno del entrelazamiento cuántico. El entrelazamiento cuántico consiste, de manera general, en que un conjunto de partículas cuánticas se encuentran entrelazadas, o

unidas profundamente de tal forma que, aunque existan millones de años luz que las separen, el cambio de estado en una de ellas puede afectar al resto de manera inmediata y por lo tanto, como ya se había dicho, de una manera más rápida de lo que viaja la luz. Recuérdese que según Einstein, c , la velocidad de la luz, representaba una constante que fijaba el límite de velocidad a la que un cuerpo pudiera desplazarse. Pues bien, después del planteamiento del teorema y de las desigualdades de Bell y después de su corroboración experimental, la constante planteada por Einstein y, por lo tanto, el límite prefijado por ella, se vieron transgredidos. Esta inusitada propiedad de los sistemas cuánticos que permitió dilucidar el hecho de que dos partículas que interactuaron en el pasado mantienen una relación de inseparabilidad, abrió un punto de quiebre en la forma en cómo se concebía el mundo sobre la base del principio de localidad y tal descubrimiento resulta fundamental para comprender las reconfiguraciones que trajo como repercusiones inevitables para la noción de causalidad. Se señaló como David Bohm emprendió sus esfuerzos para dar una interpretación causal y determinista a los procesos cuánticos en términos de variables ocultas. Para lograr dicho propósito tuvo que asumir, con base en los progresos de Bell y otros científicos, que no existen variables ocultas locales y que si existen parámetros ocultos, éstos mismos deben tener cumplir la condición de estar en posibilidad de actuar a distancia y de manera inmediata. Tales propagaciones más veloces que la luz, aceptadas en la interpretación causal de Bohm, plantearon la siguiente cuestión: ¿pueden, causa y efecto, presentarse simultáneamente, sin necesidad de un lapso en el tiempo en el que el efecto suceda a la causa? Si esto es posible, entonces se debería replantear el postulado clásico de que toda relación causal implica un suceso en el tiempo agregando que, si bien dicha sucesión suele presentarse en algunos procesos, sobre todo macroscópicos, no puede suceder lo mismo en el ámbito ultramicroscópico de los cuantos. Lo más probable es que tal propiedad de la relación causal, es decir una relación causal local, sea una propiedad relativa a ciertos casos especiales de relación causal pero no a todos; tal carácter de sucesión temporal de las relaciones causales debe ser privativo de ciertos

fenómenos físicos pero no de otros. En cualquier caso, a la luz del entrelazamiento cuántico, se tiene ante la mirada escrutadora de la ciencia, elementos que exigen una reconfiguración y un estudio más profundo de la naturaleza de la causalidad y, consecuentemente, del determinismo como su universalización. Así, en el contexto de la física clásica se tienen dos opciones, al menos: la primera sería abandonar por completo la categoría de causalidad considerándola como obsoleta para el estudio de los procesos ultramicroscópicos; y, la segunda sería aceptar la limitación de tal categoría, en la manera como se la venía planteando, despojándola de sus limitaciones y expandiendo sus alcances en la medida en que se la enriquezca con el contenido de la nueva ciencia. Si se asume la segunda vía planteada, el problema de la causalidad y el determinismo en la física cuántica ya no se plantea en términos del dilema de si éstos son o no vigentes en los procesos cuánticos, sino como el problema de esclarecer las formas complejas y específicas que asume la causalidad para determinar la forma en cómo se comportan los sistemas cuánticos.

Por otra parte, y con respecto a la segunda reconsideración de la noción clásica de la causalidad, en la que se le atribuye a todo nexo causal, el carácter de necesidad, ya se hizo una breve aproximación al hecho de que la causalidad no se manifiesta sólo como necesidad sino también como casualidad y como contingencia. Se había dicho que, según esta noción clásica, la causalidad se expresa a través de un carácter *necesario* que vincula a la causa con el efecto, lo que quiere decir que las mismas causas, reproducidas en las mismas condiciones, producen siempre los mismos efectos. Sin embargo, se ha dicho que los mismos procesos cuánticos reproducidos en las mismas condiciones pueden proporcionar resultados diferentes, ostentando una regularidad que se expresa tan sólo como promedio o como máxima probabilidad de ocurrencia. Pues bien, para abordar dicho problema es necesario acentuar el papel que cumplen las condiciones en las cuales se produce un fenómeno puesto, que en los procesos cuánticos, son desconocidos todos los factores que cumplen un papel significativo entre las

condiciones que acompañan el acaecimiento de un determinado proceso. Dichos factores que, en la física cuántica resultan incontrolables pueden ejercer una influencia considerable sobre los resultados que se obtienen, actuando como contingencias o casualidades que alteran la regularidad del proceder de los sistemas cuánticos. Así, de una misma causa puede ramificarse una multiplicidad de efectos que puede aparecer, o bien simultáneamente todos o varios de ellos, o bien uno de ellos que se concebía como probable entre varios otros, pero que, aparentemente de manera aleatoria, se produce como efecto único y singular. También puede suceder esto a la inversa, un mismo efecto puede estar ligado a una o varias causas que lo produzcan, siendo a veces insondable determinar a cual de ella o ellas se encuentra causalmente vinculado. De cualquier forma, dentro de las condiciones en las cuales se produce un efecto, pueden jugar un papel determinante ciertas variables o parámetros ocultos, los cuales en ciertas ocasiones son capaces de obrar causalmente de manera no-local, introduciendo una alteración en el efecto producido. De esta manera, las mismas causas pueden producir, en principio, los mismos efectos; pero como existen variables ocultas no-locales, las mismas marcan la posibilidad de que una misma causa pueda, bajo la acción de dichas variables dinámicas, producir diferentes efectos.

Esto hace que la causalidad dentro de la mecánica cuántica no implica que una misma causa se encuentre vinculada a un efecto de manera necesaria, ya que, en virtud de las contingencias o casualidades que se puedan presentar sobre la base de la acción no-local de variables dinámicas ocultas, dicho efecto puede dejar de aparecer para dar lugar a otro efecto. Tales variables no-locales introducen, pues, la posibilidad de aparición de contingencias o casualidades incontrolables que marcan cierta irregularidad dentro de la dinámica de los sistemas cuánticos. Por lo tanto no se puede hablar de una vinculación causal de carácter estrictamente necesario sino también casual o contingente. Esto podría ser expresado diciendo que la causalidad, en los procesos microfísicos, se hace evidentemente multívoca, lo que significa que de una causa se pueden ramificar

varios efectos y, viceversa, un efecto puede estar vinculado a varias causas, unas contingentes y otras necesarias. Este tipo de relación causal multívoca puede ser identificada en la física cuántica cuando se considera que los electrones emitidos por un disparador constituyen, por ejemplo, un grupo de procesos pertenecientes al conjunto A y las centelluelas que aparecen en una pantalla fluorescente como pertenecientes al conjunto B. De esta manera, el disparo de un electrón correspondiente a un proceso particular perteneciente al conjunto A (a_1 , a_2 , a_3 , etc.), puede producir como efecto cualquiera de las chispas pertenecientes al conjunto B (b_1 , b_2 , b_3 , etc.); y, de la misma manera, una de las chispas pertenecientes al conjunto B, puede haber sido producida por cualquiera de los disparos pertenecientes al conjunto A. De esta manera, entre ambos conjuntos de procesos existe una causalidad multívoca que, en todo caso, establece el cumplimiento del determinismo. En este caso, cada uno de los procesos del conjunto A se encuentra vinculado de manera multívoca con los efectos del conjunto B, así como los efectos del conjunto B se encuentran vinculados multívocamente a las causas que encierra el conjunto A. De esta manera:

Las relaciones de causalidad pueden ser: de efectos multívocos, cuando un mismo proceso es causa de varios procesos o de un solo proceso que no es posible determinar unívocamente dentro de un conjunto de procesos semejantes; de causas multívocas, cuando un mismo proceso efecto de varios procesos o de uno solo de ellos, pero sin que se pueda determinar con univocidad dentro del conjunto al cual pertenece; de efectos multívocos y causas multívocas a la vez, cuando varios procesos de un conjunto o uno solo de ellos que no se puede determinar unívocamente, son la causa de varios procesos de otro conjunto o de uno solo de ellos que tampoco se puede determinar de manera unívoca; y de causa y efecto biunívocos, que es el caso límite del determinismo riguroso, cuando un proceso bien determinado de un conjunto es la causa de un proceso igualmente bien determinado de otro conjunto, de manera que el segundo proceso es efecto del primero y

únicamente del primero, en tanto que el primer proceso es causa del segundo y sólo del segundo¹⁵³.

El último caso de causalidad solía ser concebido como el único existente en la naturaleza y, de hecho es el más común con que se encuentra la física clásica al estudiar los procesos macroscópicos. Sin embargo, a medida de que se fue profundizando en el conocimiento de los procesos atómicos y subatómicos, se fue haciendo más explícito el hecho de que la causalidad obra de una manera polimorfa y mucho más compleja en la que ya no sólo se puede establecer un nexo necesario entre una causa y un efecto, sino la vinculación de una causa con distintos efectos que pueden producirse y, viceversa, un efecto que puede ser producido por una variedad de causas. En este sentido, Mario Bunge afirma que ni siquiera la Interpretación de Copenhague rompe totalmente con la causalidad sino que hace explícitas las limitaciones de la causalidad clásicamente concebida:

Así, cuando escribimos la probabilidad de una transición de un sistema físico del estado 1 al estado 2 solemos atribuir esa transición a alguna fuerza (causa) usualmente representada por un potencial de interacción. Sólo que la causa y el efecto no están aquí ligados en la forma constante y unívoca afirmada por el principio causal. En otras palabras, la interpretación usual de la mecánica cuántica no barre con las causas y los efectos, sino con los nexos causales rígidos entre unas y otros¹⁵⁴.

Así, no basta con que falle la noción clásica de causalidad para afirmar la bancarrota generalizada de la misma. Se ha mostrado, cómo a la luz del carácter probabilístico de los procesos cuánticos, algunas perspectivas interpretativas se han obstinado en sostener tales aseveraciones indeterministas. Tales consideraciones pasan por alto un análisis más detenido

¹⁵³ GORTARI. Op. cit., p. 220.

¹⁵⁴ BUNGE, Mario. Causalidad: el principio de la causalidad en la ciencia moderna. Buenos Aires: Eudeba, 1965. p. 26.

de lo que implica la causalidad en un sentido amplio, decantándose por considerar que la forma clásica de concebir tal principio corresponde a la única forma concebible. Pero lo cierto, es que el carácter probabilístico de la realidad cuántica no ha servido para refutar la causalidad ni, a consecuencia de esto, el determinismo. Ha servido más bien para hacer patente la complejidad de la misma y la multiplicidad de formas en que se manifiesta, con lo cual ha servido para enriquecer las nociones humanas acerca de dicho principio. Mario Bunge hace patente esta necesidad de enriquecer la noción de causalidad y determinismo cuando explica lo siguiente:

Al calcular y al interpretar tales probabilidades de transición p_{12} , damos a entender:

a) que las transiciones no son arbitrarias ni salen de la nada, sino que surgen de estados definidos bajo acción de fuerzas también definidas; así, por ejemplo, podemos comprobar con certeza que un electrón no irradia a menos que lo acelere un campo externo; b) que las transiciones no son necesarias, en el sentido de que el estado 2 no emerge de modo regular e inequívoco del estado 1: sólo hay una cierta probabilidad p_{12} de que se produzca ésta entre muchas otras transiciones posibles, lo cual indica que en un gran número N de casos la transición $1 \longleftrightarrow 2$ ocurrirá, con certeza casi completa, alrededor de Np_{12} veces¹⁵⁵.

De esta manera debe concebirse que la relación causal, no corresponde a un nexo aislado de la totalidad de los sistemas en medio de los cuales participa, puesto que eso lleva a una concepción simplista de la naturaleza de la causalidad. En realidad, la causalidad rigurosa y unívocamente necesaria se manifiesta tan sólo en algunos de los sistemas físicos del mundo; en otros dominios de la realidad objetiva, priman los nexos multívocos que se encuentran bastante ligados a la probabilidad objetiva de ocurrencia. Lo que existe, en lugar de un simple mecanicismo, es un complejo entramado, en el que cada causa y cada efecto se encuentran mediados e interconectados con una multiplicidad de nexos. Esto fue

¹⁵⁵ Ibíd, p. 27.

anticipado por Engels quien advirtió el carácter complejo de la causalidad ya en el siglo XIX: “Solamente partiendo de esta acción mutua universal podemos llegar a la verdadera relación de causalidad. Para poder comprender los fenómenos sueltos, tenemos que arrancarlos a la trabazón general, considerarlos aisladamente, y es entonces cuando se manifiestan los movimientos mutuos, cuando vemos que unos actúan como causa y otros como efecto”¹⁵⁶. Sin embargo, en los procesos cuánticos, resulta bastante complicado aislar los pares causa-efecto de la concatenación general en la que se encuentran inmersos; y es debido a esa imposibilidad de establecer cuáles son todos los nexos involucrados en los procesos cuánticos, lo que impide determinar rigurosamente las vinculaciones específicas que producen ciertos efectos inusitados.

Para finalizar el apartado de esta conclusión se asume como satisfactoria la definición de causalidad expresada por Elí de Gortari:

La causalidad constituye la expresión particularizada de la conexión y acción recíproca existentes en todos y cada uno de los procesos del universo. En rigor, cada proceso se encuentra conectado con los demás de una manera múltiple y polimorfa: ya sea de un modo directo, por contigüidad, o indirectamente, a través de otros procesos concatenados. Igualmente, en cada proceso existe una interdependencia y una interconexión entre todos y cada uno de sus elementos y aspectos; siendo esta interconexión intrínseca la que produce la unidad del proceso. A su vez, la conexión universal entre los procesos y en el interior de los procesos es una relación activa y recíproca. Los movimientos y los cambios de cada proceso influyen en las transformaciones y los movimientos de los otros procesos y, a su vez, reciben la influencia de ellos. Esta acción recíproca es una causalidad multívoca entre los procesos que se condicionan mutuamente. Así, una acción produce como efecto otra acción; pero, al propio tiempo, el efecto actúa a su vez sobre la acción que lo causa. De esta manera, toda acción es, simultáneamente efecto y causa, en sus múltiples relaciones con otras acciones; y existe una continua

¹⁵⁶ ENGELS, Friedrich. *Dialéctica de la naturaleza*. México D.F.: Grijalbo S.A., 1961. p. 197.

transferencia de causa y efecto en la transformación recíproca de las acciones. Entonces, determinando las formas de movimiento del universo y las relaciones activas entre ellas, es como se conoce al universo en su mayor y más profunda objetividad. Al mismo tiempo, partiendo de la acción recíproca universal es como se puede llegar a determinar con rigor la conexión de causalidad. Porque, considerando a los procesos en su separación relativa dentro de su interconexión general, es como se destacan los cambios de movimiento y las transformaciones cualitativas en las cuales algunos de ellos se muestran como causas y otros como efectos¹⁵⁷.

Pero a esta noción tan amplia de causalidad, que abarca todas las tipificaciones anteriormente aludidas sólo se ha podido ir llegando en la medida en que la ciencia ha ido introduciéndose en los rincones más profundos de la materia. Hubiera resultado complejo llegar a tal formulación sobre la base de los procesos macroscópicos estudiados por la física clásica; sólo en la esfera ultramicroscópica de los cuantos se ha podido explicitar las formas complejas y polimorfas en que se expresa la causalidad como expresión particularizada del determinismo y, en general, del vasto entramado de relaciones que constituye el universo. En todo caso, se trata de una reconfiguración bastante significativa del principio de causalidad.

f) La interpretación de David Bohm es la alternativa más viable para explicar los procesos físico-cuánticos desde una perspectiva determinista

Cuando se señalaron las principales interpretaciones que se han planteado en torno a la física cuántica en general y en torno al problema del determinismo en particular se hizo evidente que la interpretación causal o de la onda piloto planteada por David Bohm resulta ser la más coherente con lo que implicaría una visión del mundo determinista. Bohm plantea una interpretación que incorpora

¹⁵⁷ GORTARI. Op. cit., p. 194.

importantes desarrollos de la física cuántica como los planteados por Louis de Broglie, quien consideró la necesidad de asociar una onda guía a las partículas ultramicroscópicas, la cual sería la responsable de ir fijando las trayectorias que atraviesan las partículas a través del espacio. También recogió la posibilidad de introducir un orden subyacente al orden cuántico, un *orden* implicado conformado por variables dinámicas ocultas de carácter no-local, encargadas de establecer ciertas relaciones causales entre los procesos atómicos y subatómicos.

Los dos aspectos decisorios que dan consistencia a la interpretación de David Bohm, desde el punto de vista filosófico, son fundamentalmente dos: el realismo y el determinismo.

El primer aspecto hace referencia a la consideración de que existe un mundo objetivo independientemente de la conciencia humana y de la observación. En esta perspectiva, el mundo cuántico existe de manera objetiva, aunque el conocimiento que la ciencia tenga sobre él sea siempre aproximado, imperfecto y susceptible de ser conocido con un grado creciente de profundidad. Aunque los objetos cuánticos sean entidades de una complejidad a veces irrepresentable con claridad, eso no implica que, independientemente de lo imperfectas que puedan ser dichas representaciones, tales objetos no se encuentren ahí, por fuera de las imágenes que la mente humana fabrique para intentar conocerlos. En tal sentido, el mundo cuántico sí existe, a diferencia de lo sostenido por Bohr, existe y no se reduce a ser una representación abstracta mecánico-cuántica. De hecho, si las partículas atómicas y subatómicas constituyen parte del material elemental del que se encuentra estructurada toda la realidad, resulta un contrasentido privarle a dichas partículas de su carácter objetivo. Asumir que dichas partículas y dichos procesos cuánticos sólo existen en la mente de los científicos implicaría negar la realidad objetiva de todo lo existente, puesto que si todo lo existente se compone de elementos y procesos cuánticos, y éstos son un constructo abstracto de la mente humana, entonces todos los compuestos complejos de átomos y partículas

atómicas como los seres humanos, los planetas y el universo, serían un constructo abstracto de la mente humana.

Ahora bien, existen matices con respecto a la perspectiva realista del mundo cuántico. Una sería la perspectiva realista ingenua, que considera que las representaciones que la mente humana se hace de los objetos y procesos atómicos y subatómicos, y de cualquier proceso de la realidad, son un calco perfecto de dicha realidad ultramicroscópica; un reflejo idéntico, como si de un espejo se tratara, en el que aparece nítida la imagen del mundo de los cuantos. Esta perspectiva realista ingenua abordaría el proceso cognoscitivo de una manera demasiado simplista y, por demás, demasiado crédula. Tal perspectiva “realista”, termina a la larga por trocarse en su contraria, es decir, en una perspectiva anti-realista, puesto que implicaría asumir que ser humano es capaz de conocer la realidad tal cual es, sin tener en cuenta el proceso histórico y contradictorio, a través del cual las nociones del conocimiento se van desarrollando siendo propensas siempre hacia la falibilidad y llevando en su esencia el sello indeleble de la imperfección cognoscitiva. Así, el realista ingenuo se vuelve un anti-realista, porque reflejar mecánicamente la realidad no se corresponde con el proceso real mediante el cual el ser humano conoce. Además, la estructura del pensamiento del ser humano siempre está imbuida de nociones preconcebidas que constituyen el tamiz a través del cual se abordan los datos de la experiencia, de tal manera que los procesos estudiados siempre van a ser una combinación de elementos de la realidad objetiva representados en la mente humana más las nociones abstractas a partir de las cuales se abordan e interpretan esos elementos de la realidad objetiva que se convierten en material intelectual. Así, el realismo ingenuo acepta el presupuesto válido de que la realidad existe independientemente de la conciencia y de que la misma puede, en principio, ser cognoscible, pero falla al agregar, en seguida que el conocimiento de esa realidad objetiva se da como un reflejo perfecto en la mente de las propiedades del mundo, aspecto expresado en la consideración del realista

ingenuo de que el mundo y sus propiedades son tal y como se las representa en su mente. Esto se torna mucho más insostenible cuando el realista ingenuo pretende que conoce cabalmente objetos tan alejados de la experiencia común de los seres humanos como lo son los objetos cuánticos. Si incluso los procesos macroscópicos son siempre imperfectamente conocidos, mucho más lo serán los objetos ultramicroscópicos; elaborar una imagen científica de los procesos cuánticos encierra muchas complicaciones, puesto que los mismos no son procesos con los que la mente y los sentidos puedan tener una relación directa. Los objetos cuánticos están muy lejos de ser representados con claridad; si bien la mente elabora elementos abstractos para representarse las partículas cuánticas, de ello no debe inferirse que exactamente así deben ser. Un electrón no es una simple bolita diminuta con trayectorias definidas a lo largo del espacio, así como resultó irrisorio el modelo atómico semejante a un pastel que Thompson planteó, y como resultó también insuficiente el representarse al átomo como un sistema solar en miniatura. Las representaciones que los científicos han ido haciendo de la realidad no se han correspondido exactamente con la realidad, y esto es algo que el realismo ingenuo no tiene en cuenta.

Por otra parte se encuentra el realista crítico que parte del mismo presupuesto del realista ingenuo, esto es, la existencia objetiva de un mundo independiente de la percepción y de cualquier proceso de la mente; sin embargo, el realista crítico no acepta que sus objetos de pensamiento reflejen de manera exacta el mundo objetivo y sus propiedades. Asume, por el contrario, el hecho de que sus representaciones son siempre aproximativas, que reflejan en un determinado grado la objetividad del mundo pero nunca de una manera perfecta y total. El mundo es demasiado complejo y la mente demasiado limitada para el realista crítico, como para asumir la exagerada credulidad de quien supone que el acto de conocer consiste en un simple reflejo mecánico del mundo en la mente. El realista crítico asume que el proceso del conocer encierra un recorrido histórico a través del cual las nociones y las representaciones que la mente se hace del mundo son

siempre aproximadas y transitorias, entrañando siempre la posibilidad de dar lugar a otras mejores, capaces de dar razón con un grado progresivamente mayor de profundidad. Para el realista crítico, las representaciones mentales del mundo son siempre imperfectas, pero corresponden además a un eslabón necesario para pasar a mejores representaciones. Así por ejemplo, el átomo de Thompson estaba equivocado pero contenía ya la idea de que al interior del átomo existen cargas positivas y negativas; este modelo embrionario dio lugar al de Rutherford que también estaba equivocado pero postulaba el acierto de la existencia de un núcleo atómico; a éste le sucedió el de Bohr que también resultó insuficiente pero fue capaz de avanzar al introducir conceptos de cuantización y discontinuidad en el interior del átomo. Y así sucesivamente, las representaciones del mundo objetivo en general, y del mundo cuántico en particular, son transitorias pero a cada paso que dan van agregando nuevos elementos que le permiten incrementar sus niveles de objetividad. El realismo crítico acepta esto, para él las representaciones reflejan la realidad objetiva pero no de manera mecánica y absoluta sino en un proceso de aproximación continua siempre perfectible, puesto que considera que la realidad objetiva es prácticamente inagotable, encerrando la posibilidad de ser siempre conocida con un mayor grado de profundidad.

Dicho esto, el realismo de David Bohm constituye un abordaje crítico de la realidad objetiva. Para Bohm, sólo en el sucesivo devenir del desarrollo histórico del conocimiento científico es posible ir esclareciendo la adecuación de las nociones de la ciencia con la realidad. Un ejemplo de ello es que, en un inicio, éste científico no consideró la necesidad de incorporar la no-localidad en su abordaje de los procesos cuánticos; pero en la medida en que la investigación fue profundizando, gracias a Bell, Aspect y otros, se hizo patente la imperfección de sus nociones y la necesidad de ser corregidas y complementadas con el nuevo contenido que la práctica experimental hizo ineludible ignorar. De esta manera, también al plantear la posibilidad de la existencia de variables ocultas no-locales, se está presuponiendo la existencia de un orden implicado que subyace a la realidad

cuántica; tal consideración encierra la posibilidad de que el conocimiento sobre los procesos cuánticos, tal como lo planteó Bohm, sea también susceptible de ser profundizado; tal vez un día la ciencia llegue a escudriñar más profundo en la realidad ultra-microscópica, arrojando nueva luz con respecto a cuáles sean algunos de esos parámetros ocultos no-locales que se esconden tras la contingencia de los fenómenos cuánticos, otorgándoles el orden que les permite aliarse en entramados específicos para componer la multiplicidad de cuerpos macroscópicos estables y que obedecen a leyes ordenadoras más evidentes.

En cuanto al segundo aspecto, el determinismo de Bohm, está lejos de identificarse con el rígido mecanicismo laplaceano. Si bien se admite en la visión de Bohm la universalidad de la causalidad, se especifica la imposibilidad de que tal causalidad sea simplificada como en el contexto de la física clásica. Empezando por el hecho de que Bohm estipula la existencia de procesos no-locales, lo cual implica, como antes se señaló, una reconfiguración de la causalidad, en la que el lapso temporal entre causa y efecto no se concibe como estrictamente necesario sino como privativo de ciertos procesos; con esto se abrió la posibilidad de que la causalidad se pueda presentar como un nexo que se expresa en términos de simultaneidad, es decir que, en virtud de la no-localidad, un efecto y una causa pueden sucederse al mismo tiempo, sin estar mediados por un orden de sucesión. También se señaló, como dicho determinismo no puede desconocer la importancia de la casualidad y de los procesos contingentes que hacen una apertura a la novedad, impidiendo que el determinismo se fosilice en una rígida relación en la que todo está determinado de antemano de modo que las mismas causas producen invariablemente los mismos efectos. A la luz de los descubrimientos del carácter probabilístico de la realidad cuántica, Bohm advirtió que las fluctuaciones aleatorias de los procesos de dicha esfera de la realidad no podían ser eludidos, pero constató además que dichos procesos por ser aleatorios, casuales y contingentes, no por ello dejaban de detentar un orden implícito de gran complejidad en el que lo casual y lo necesario se entrelazan para

dar a luz el complejo entramado de los procesos ultramicroscópicos e, incluso, del universo en su totalidad. De esta manera se expresa David Bohm con respecto al importante papel de la casualidad en los procesos deterministas de la naturaleza:

Vemos, por lo tanto, el importante papel de la casualidad. Si le damos suficiente tiempo, hace posible y de hecho incluso inevitable, todo tipo de combinaciones de cosas. Con toda seguridad llegará un momento en que ocurrirá una de esas combinaciones que pone en marcha procesos irreversibles o líneas de desarrollo que sustraen el sistema de la influencia de fluctuaciones casuales. Así, uno de los efectos de la casualidad es ayudar a ‘agitar las cosas’ de tal manera que permita el inicio de líneas de desarrollo cualitativamente nuevas”¹⁵⁸.

Necesidad y casualidad constituyen, pues dos aspectos ineludibles de la realidad que se entrelazan, complementándose, para formar una contradicción no excluyente sino sintética. La causalidad se ramifica en diversas manifestaciones que se conjugan en un complejo entramado a través de diferentes nexos, muchos de ellos inescrutables, para dar a luz a una condición determinista que se expresa por medio de una vastísima multiplicidad de particularidades y singularidades. David Bohm ha proporcionado, pues, una nueva perspectiva determinista del mundo en general y de los procesos cuánticos en particular, aunque habría que añadir que los procesos probabilísticos, multívocos, como los cuánticos, representan un aspecto de la realidad mucho más general que la exactitud y la univocidad a través de la cual obran los procesos macroscópicos. La incapacidad humana para determinar los nexos causales que proporcionan regularidad al cosmos no implica la ausencia de éstos mismos; es un acto contraproducente atribuirle a la naturaleza algo que en realidad es privativo de nuestras limitaciones

¹⁵⁸ BOHM, David: Causality and chance in modern physics. London: Routledge, 1957. p. 17: “We see, then, the important role of chance. For given enough time, it makes possible, and indeed even inevitable, all kinds of combinations of things. One of those combinations which set in motion irreversible processes or lines of development that remove the system from the influence of the chance fluctuations is then eventually certain to occur. Thus, one of the effects of chance is to help <<stir things up>> in such a way as to permit the initiation of qualitatively new lines of development”.

cognoscitivas relativas para acceder a ella, puesto que conlleva al estancamiento investigativo. En tal sentido, hay que agregar que la heterodoxia de David Bohm ha permitido poner en entredicho el dogmatismo en el que se había llegado a caer después de que la Interpretación positivista de Copenhague se posicionara como la dominante gracias a la fama de los grandiosos científicos que le dieron a luz. La interpretación de Copenhague se había venido a concebir como una ortodoxia cuántica incuestionable cuyos presupuestos se afirmaban definitivos. Ante esto, David Bohm vino a ofrecer una alternativa contrapuesta al subjetivismo e indeterminismo de la primera. Aunque, como hemos visto, ésta, la interpretación de Bohm, no es la única interpretación alterna que se ha propuesto, sí resulta ser la más consecuente y sólida con el determinismo y la objetividad, puesto que, por un lado es capaz de hacer las mismas predicciones empíricas que la interpretación estándar, debido a que comparte buena parte de su formalismo matemático, y, por otro lado ha roto con el prejuicio positivista de que el conocimiento científico no puede transgredir las estrechas fronteras de lo directamente experimental. Bohm ha ofrecido la posibilidad de transgredir a los fenómenos anclados a la medición, para escudriñar en el estudio de las cosas mismas aunque como un realista crítico, ha asumido la imposibilidad de reflejar la realidad objetiva de una manera absoluta y mecánica, entregándose a la difícil tarea de tratar de explicar el mundo que subyace a la experiencia científica. De nuevo, la ciencia será siempre aproximativa e imperfecta y es una limitación impuesta plantearse el presupuesto de que sólo se debe hablar de lo directamente experimentable; por el contrario, hay que romper con ello puesto que la experiencia es limitada y hay regiones de la realidad donde sólo el ojo de la mente, racionalmente coordinado, y la imaginación científicamente guiada pueden llegar, además, la experiencia humana, en continua expansión, va a ser siempre una partícula limitada en comparación del vasto entramado universal que aguarda para ser conocido. Fue imposible para David Bohm conformarse con la nociva autocomplacencia utilitaria que implicaría asumir que la física cuántica es una excelente herramienta para hacer predicciones y nada más. Sin esa actitud

rebelde y heterodoxa, la ciencia jamás avanzaría y se convertiría en un simple instrumento que nada nos diría acerca de la naturaleza de la realidad. David Bohm nos demostró que no se encuentra de ninguna manera justificado el conformismo ni los argumentos de autoridad, siempre hay un lugar más lejano, más allá de lo dado, al que la ciencia puede aspirar llegar. Y las profundidades de la realidad y de su determinismo subyacente, fueron dos destinos que éste genial científico nunca se tuvo como vedados alcanzar.

BIBLIOGRAFÍA

ABBAGNANO, Nicolás. Historia de la filosofía, tomo II: Filosofía moderna-filosofía postkantiana. Barcelona: Montaner y Simon, S.A., 1955.

BOHM, David. Causality and chance in modern physics. London: Routledge, 1957.

----- La totalidad y el orden implicado. Barcelona: Editorial Kairos, 1980.

BUNGE, Mario: A la caza de la realidad: la controversia sobre el realismo. Madrid: Gedisa Editorial, 2006

----- Causalidad: el principio de la causalidad en la ciencia moderna. Buenos Aires: Eudeba, 1965.

----- Filosofía de la física. Barcelona: Ariel, 1978.

CALA, Favio y ESLAVA, Gustavo. Mecánica cuántica, sobre su interpretación, historia y filosofía. Bogotá: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 2011.

CAPEC, Milic. El impacto filosófico de la física contemporánea. Madrid: Editorial Tecnos, 1961.

CARLEDGE, Paul: Demócrito. Santa Fe de Bogotá: Grupo Editorial Norma, 1999.

DALLA Chiara, M.L., y, FRANCIA, Toraldo di. Introducción a la filosofía de la ciencia. , Barcelona: Editorial Crítica, 2001.

DESCARTES, René. Meditaciones metafísicas con objeciones y respuestas. Madrid: Ediciones Alfahuara, 1977.

DIRAC, P,A,M.. Fundamentos de la física cuántica. Barcelona: Ariel, 1937.

ENGELS, Friedrich. Dialéctica de la naturaleza. México D.F.: Grijalbo S.A., 1961.

----- Ludwig Feuerbach y el fin de la filosofía clásica alemana.
Moscú: Gospolitizdat, 1955.

EPICURO: Epístola a Heródoto. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, 2008.

FARRINGTON, Benjamin. La rebelión de Epicuro. Barcelona: Ediciones de Cultura Popular, 1968.

FORTÍN, Sebastián: Determinismo e indeterminismo en mecánica cuántica. Madrid: Editorial Biblioteca Nueva. 2015.

GAO, Shan. A Quantum Physical Effect of Consciousness. Sydney: Unit for HPS & Centre for Time, SOPHI, University of Sydney, 2006.

GONZALES Fernández, María Pilar. Probabilidad y causalidad en la filosofía de Born. Madrid: Revista “Logos. Anales del seminario de metafísica”, Vol. 38, 2005.

GORTARI, Elí de. Dialéctica de la física. México D.F.: Universidad Autónoma de México, Dirección General de Publicaciones, 1964.

----- Ensayos filosóficos sobre la ciencia moderna. México, D.F.: Grijalbo, 1984.

HAMPSHIRE, Stuart. Spinoza. Madrid: Alianza Editorial, 1982.

HOLBACH, Paul Henry. Sistema de la naturaleza. Moscú: Editorial Progreso, 1940.

JARAMILLO Uribe, Juan Manuel: ¿Es la ciencia una rama de la literatura fantástica?, pretexto para una reflexión sobre el realismo. Manizales: Universidad de Caldas, 2001.

JUAN, Antonio Aparicio. La teoría cuántica y sus interpretaciones: un enfoque filosófico realista. Madrid: Revista Laguna, No. 13. 2003.

KUHN, Thomas S.. La revolución copernicana. Barcelona: Ediciones Orbis S.A., 1987.

KUMAR, Manjit, Quántum: Einstein, Bohr y el gran debate sobre la naturaleza de la realidad. Barcelona: Kairós S.A., 2011.

LAPLACE, Pierre Simón de. Ensayo filosófico sobre las probabilidades. Barcelona: Ediciones Altaya, 1995.

LAVOZ Torres, Agustín Fernando. La teoría de la parénklisis atómica y su rol en la ontología de Epicuro: Una reconstrucción y una interpretación. Santiago de Chile: Universidad Alberto Hurtado, 2012.

LENIN, V.I.: Materialismo y empiriocriticismo: notas críticas de una filosofía reaccionaria. México D.F.: Editorial Grijalbo, S.A., 1967.

LOMBARDI, Olimpia y LÓPEZ, Cristian. Ergodicidad y determinismo. Madrid: Editorial Biblioteca Nueva, 2015.

LUCRECIO Caro, Tito. De rerum Natura. Barcelona: Bosch-Casa Editorial, 1976.

MELUJIN, S.; OMELIANOVSKY, M.; y KUTNETSOV, L. V.. Problemas filosóficos de la física contemporánea. México, D.F.: Grijalbo, 1969.

NEWTON, Isaac. Principios matemáticos de la filosofía natural. Madrid: Tecnos S.A., 1987.

NOVACK, George. Los orígenes del materialismo. Bogotá: Editorial Pluma, 1977.

OKON, Elias El problema de la medición en mecánica cuántica. Coyoacán: Instituto de Investigaciones Filosóficas, Universidad Autónoma de México, 2014.

PAZ, Juan Pablo. Einstein contra la mecánica cuántica: el azar, la ignorancia y nuestra ignorancia sobre el azar. Buenos Aires: Departamento de Física “José Giambiagi”, 2006.

POPPER, Karl R.. Lógica de la investigación científica. Madrid: Editorial Tecnos, 1959.

ROSENTAL, M.M. y STRAKS, G.M.. Categorías del materialismo dialéctico. México D.F.: Grijalbo S.A., 1958.

RUPERT Hall, Alfred. La revolución científica. Barcelona: Editorial Crítica, 1985.

SAGAN, Carl. Cosmos. Barcelona: Editorial PLANETA, 1992.

SILVER, Brian L.. El ascenso de la ciencia. México D.F.: Fondo de Cultura Económica, 2005.

SPINOZA, Baruch de. Ética demostrada según el orden geométrico. Madrid: Ediciones Orbis S.A., 1980.

TORRE, Alberto Clemente de la. Física cuántica para filo-sofos. México D.F.: Fondo de Cultura Económica, 2000.

VANNEY, Claudia. Indeterminismo cuántico y pluralismo cognoscitivo, Fronteras del determinismo científico. Madrid: Editorial Biblioteca Nueva, 2015.

VANNI, Leonardo. Historias en mecánica cuántica que aparece en la recopilación de ensayos "Fronteras del determinismo científico". Madrid: Editorial Biblioteca Nueva, 2015.

WOODS, Alan y GRANT, Ted. Razón y revolución: filosofía marxista y ciencia moderna. Madrid: Casa Vieja, 1995.