



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE AGUASCALIENTES

**CENTRO DE CIENCIAS SOCIALES Y HUMANIDADES**

**DEPARTAMENTO DE FILOSOFÍA**

**T E S I S**

**EL INDETERMINISMO Y EL PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE DE  
HEISENBERG**

**PRESENTA**

Cresencio Salvador Medina Rivera

**PARA OBTENER EL GRADO DE**

**DOCTOR EN CIENCIAS SOCIALES Y HUMANIDADES**

**TUTOR**

Dr. José de Lira Bautista

**COMITÉ TUTORAL**

Dr. Netzahualcóyotl Castañeda Leyva  
Dr. Enrique Luján Salazar

**LECTORES**

Dra. Yolanda Cadenas Gómez  
Dr. Ángel Eduardo Muñoz Zavala

**Aguascalientes, Ags. 18 de Mayo de 2011**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE AGUASCALIENTES

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE TESIS  
OF.DEC. CCSyH/Posgrados N° 04/11

**C. CRESENCIO SALVADOR MEDINA RIVERA  
ALUMNO DEL DOCTORADO EN CIENCIAS  
SOCIALES Y HUMANIDADES  
P R E S E N T E**

Por medio del presente me permito comunicarle que el proyecto de Tesis: "**EL INDETERMINISMO Y EL PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE DE HEISENBERG**" para optar el grado de **DOCTOR**; ha sido aprobado.

Igualmente, le comunico que he designado como Comité Tutorial para la elaboración de dicha tesis a, DR. JOSÉ DE LIRA BAUTISTA, DR. NETZAHUALCOYOTL CASTAÑEDA LEYVA Y DR. ENRIQUE LUJAN SALAZAR.

ATENTAMENTE  
Aguascalientes, Ags., 16 de mayo de 2011  
"SE LUMEN PROFERRE"

**DR. DANIEL EUDAVE MUÑOZ  
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS SOCIALES Y HUMANIDADES**

c.c.p.- Departamento de Historia  
c.c.p.- Tutores de Tesis  
c.c.p.- Archivo  
pma



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE AGUASCALIENTES

DR. DANIEL EUDAVE MUÑOZ  
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS SOCIALES Y HUMANIDADES  
PRESENTE

Estimado Señor Decano:

Hago de su conocimiento que el alumno del DOCTORADO EN CIENCIAS SOCIALES Y HUMANIDADES Cresencio Salvador Medina Rivera ha presentado la integración final de su tesis titulada: **"EL INDETERMINISMO Y EL PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE DE HEISENBERG"**.

La tesis incorpora los elementos teóricos y metodológicos que le permiten ser defendida en el examen de grado reglamentario, por ello se solicita que se proceda a los trámites correspondientes para la presentación de dicho examen.

ATENTAMENTE  
*"SE LUMEN PROFERRE"*  
Aguascalientes, Ags., 12 de mayo de 2011

Por el Comité Tutorial

  
Dr. José de Lira Bautista

  
Dr. Netzahualcoyotl Castañeda Leyva

  
Dr. Enrique Luján Salazar



MAESTRO CRESENCIO SALVADOR MEDINA RIVERA  
P R E S E N T E.

Por este conducto hago de su conocimiento que el artículo: "**Acercamiento al indeterminismo científico**", presentado por usted en coautoría con el DOCTOR JOSÉ DE LIRA BAUTISTA, para su dictaminación y eventual publicación en de **CALEIDOSPIO. REVISTA DE CIENCIAS SOCIALES Y HUMANIDADES** (ISSN 1405-7107), ha sido aceptado para su inclusión en el número 26 que aparecerá en el semestre julio-agosto del 2009.

ATENTAMENTE  
"SE LUMEN PROFERRE"  
Aguascalientes, Ags., 24 de mayo de 2009.

DOCTOR FERNANDO PLASCENCIA MARTÍNEZ  
DIRECTOR

c.c.p. Dra. Consuelo Meza Márquez, Secretaría Técnica del DIP.  
c.c.p. Dr. José de Lira Bautista.

## AGRADECIMIENTOS

*A mis familiares y amigos:  
por estar siempre conmigo,  
baje o suba la rueda.*

*A mi tutor y cotutor: por su incondicional  
apoyo, sus conocimientos y su impar bonhomía.*

*A la Universidad Autónoma de Aguascalientes,  
por abrir espacios de crecimiento, y por  
permitirme estar a su lado en el continuo intento  
de lograr un mundo mejor.*

*A mi comité tutorial y a mis lectores, pues sin sus  
observaciones, todo habría sido más difícil.*

*Y sobre todo, y como siempre:  
“gracias a la vida... que me ha  
dado tanto”*

*ESTE TRABAJO ESTÁ DEDICADO A:*

*Mi padre (q. e . p. d.), mi madre y mis hermanos,  
por ser parte de mi vida.*

*Todos aquéllos que me han ayudado,  
y que siempre llevo en la memoria.*

*Y por supuesto, especialmente a:  
Mi esposa y mis hijos: Paulina, Irene y  
Salam: por ser el pan y la sal de mi vida.*

*“Quienes luchan toda la vida.  
Esos son los imprescindibles.”*

*—B. Brecht—*

## ÍNDICE

|          |   |     |
|----------|---|-----|
|          | <b>Resumen</b> .....  | i   |
|          | <b>Abstract</b> .....   | ii  |
|          | <b>Introducción</b> .....   | iii |
| <b>1</b> | <b>El indeterminismo</b> .....                                      | 1   |
|          | Introducción.....   | 1   |
| 1.1      | El determinismo .....   | 1   |
| 1.1.1    | Aparición en las primeras culturas .....                            | 1   |
| 1.1.2    | En la cultura griega.....   | 3   |
| 1.1.3    | La edad media .....   | 22  |
| 1.1.4    | La edad de la razón.....  | 25  |
| 1.1.5    | Laplace y el determinismo .....                                     | 36  |
| 1.1.6    | Embates de la física al determinismo .....                          | 41  |
| 1.2      | Tipos de determinismo .....   | 43  |
| 1.2.1    | Determinismo religioso y metafísico .....                           | 43  |
| 1.2.2    | Determinismo científico .....                                       | 45  |
| 1.3      | Nacimiento del indeterminismo .....                                 | 47  |
| 1.4      | El indeterminismo científico .....                                  | 49  |
| 1.4.1    | Tipos de indeterminismo: religioso y metafísico .....               | 49  |
| 1.4.2    | El indeterminismo científico .....                                  | 50  |
| 1.5      | Exponentes principales del indeterminismo.....                      | 55  |
| 1.6      | Conclusiones .....  | 56  |
| <br>     |   |     |
| <b>2</b> | <b>El indeterminismo y la física</b> .....                          | 58  |
|          | Introducción.....   | 58  |
| 2.1      | Objeciones de Popper al indeterminismo de la mecánica cuántica..... | 58  |
| 2.2      | La relación causal.....   | 65  |
| 2.3      | Las regularidades estadísticas .....                                | 81  |
| 2.4      | Causalidad y medición .....   | 90  |
| 2.5      | ¿Por qué es determinista la física clásica?.....                    | 107 |
| 2.6      | El indeterminismo de la mecánica cuántica .....                     | 117 |
| 2.7      | Los objetos atómicos y el PIH.....                                  | 127 |
| 2.8      | Conclusiones .....  | 129 |
| <br>     |   |     |
| <b>3</b> | <b>Génesis de la mecánica cuántica</b> .....                        | 134 |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
|          | Introducción .....                                  | 134        |
| 3.1      | Introducción histórica .....                        | 135        |
| 3.2      | Opiniones de científicos.....                       | 151        |
| 3.3      | Opinión de Popper acerca de PIH.....                | 169        |
| 3.4      | Conclusiones .....                                  | 171        |
| <b>4</b> | <b>Dos teorías .....</b>                            | <b>173</b> |
|          | Introducción .....                                  | 173        |
| 4.1      | Antecedentes .....                                  | 173        |
| 4.2      | Born y la probabilidad .....                        | 183        |
| 4.3      | Los objetos atómicos y la dualidad.....             | 190        |
| 4.4      | ¿La mecánica cuántica es explicativa? .....         | 197        |
| 4.5      | Heisenberg y la incertidumbre .....                 | 204        |
| 4.6      | Conclusiones .....                                  | 217        |
| <b>5</b> | <b>PIH: ¿Indeterminación o incertidumbre? .....</b> | <b>220</b> |
|          | Introducción .....                                  | 220        |
| 5.1      | El Principio de Incertidumbre de Heisenberg.....    | 221        |
| 5.2      | PIH y los problemas de la medición .....            | 238        |
| 5.3      | El azar y el proceso de medida .....                | 252        |
| 5.4      | La mínima información: el cuanto de acción.....     | 266        |
| 5.5      | La medición y el colapso de $\Psi$ .....            | 272        |
| 5.6      | PIH y PCB: sostén de la teoría cuántica .....       | 274        |
| 5.7      | Conclusiones .....                                  | 280        |
|          | <b>Conclusiones .....</b>                           | <b>289</b> |
|          | <b>Bibliografía .....</b>                           | <b>306</b> |
|          | <b>Anexo .....</b>                                  | <b>A.1</b> |

## RESUMEN

Desde sus orígenes, la mecánica cuántica ha sido fuente de controversias, pues los dilemas teóricos que aparecen al solucionar problemas relacionados con el átomo son vastos y profundos, situándose, incluso, más allá del dominio de la física. Las soluciones propuestas por la teoría cuántica cimbraron los supuestos fundamentales de la física clásica: el determinismo, la continuidad y la objetividad, pues en la teoría aparecen el indeterminismo, la discretización natural y el subjetivismo como elementos inherentes al mundo atómico. Y es que para resolver los problemas, la mecánica cuántica axiomatizó la superposición de una partícula y una onda en un único objeto cuántico, e impulsó la probabilidad y la estadística como las herramientas matemáticas esenciales de su estructura teórica. La superposición de imágenes clásicas, aunada a la imposibilidad de medir con precisión qué tipo de objetos estamos observando, llevó a la postulación de un desarrollo teórico que brinda fortaleza al formalismo matemático, físico y filosófico de la teoría: el Principio de Incertidumbre (o de indeterminación) de Heisenberg (PIH).

En este trabajo se buscó clarificar en qué consiste el indeterminismo, apoyándose en el desequilibrio de los sistemas físicos como el causante de las regularidades estadísticas. Para ello, se efectuó un estudio probabilista usando odds ratio, encontrándose que es más probable una naturaleza causalista que una totalmente azarosa. Esto es fundamental para comprender por qué PIH es indeterminista. Además, se utilizó la información, en el sentido de Brillouin, que proporciona un objeto atómico, para concluir que PIH vale, y que es la expresión matemática de PIH quien lo aleja de la causalidad y no permite medir simultáneamente las variables requeridas para determinar el comportamiento de un sistema físico, además de vincularlo fuertemente con la estadística y con la medición asociada a las observaciones; es este indeterminismo estadístico el que se ha trasladado al indeterminismo filosófico. Asimismo, se concluye que PIH erradica la causalidad en el mundo cuántico dado que no puede determinar con exactitud el comportamiento de un único ente atómico (a partir del comportamiento grupal), porque se carece de desarrollos teóricos más profundos y completos que permitan modificar la visión azarosa de la naturaleza, y por el estado en que se encuentra la tecnología asociada a las mediciones. Aún así, y según la teoría cuántica, PIH se presume como una ley fundamental de la naturaleza que promulga la existencia de un azar objetivo, donde se asume que la aleatoriedad subyace en todo suceso natural. Sólo nos resta esperar por ver si esto es verdad, pues sólo el tiempo dirá si PIH está en lo correcto o debe modificarse.

## ABSTRACT

From their origins, quantum mechanics has been source of controversies, because the theoretical dilemmas that they appear when solving problems related with the atom are vast and deep, being located, even, beyond the domain of the physics. The solutions proposed by quantum mechanics swinging the fundamental suppositions of the classic physics: the determinism, the continuity and the objectivity, because in the theory the indeterminism, the discrete events and the subjectivism like inherent elements appear to the atomic world. So, to solve the problems, quantum mechanics made axiom the overlapping of a particle and a wave in an only quantum object, and it impelled the probability and the statistic as the essential mathematical tools of the theoretical structure. The overlapping of classic images, joined to the impossibility of measuring accurately what type of objects we are observing, it took to the postulation of a theoretical development that offers strength to the mathematical, physical and philosophical formalism of the theory: the Heisenberg's Uncertainty (or indetermination) Principle (PIH).

In this work I was looked for clarify on what it consist the indeterminism, leaning on in the imbalance of the physical systems as the causing of the statistical regularities. For it, I made a study using odds ratio, and I found that it's more probable a natural causality that a completely risky one. This is fundamental to understand why PIH is indeterminist. Also, I used the Brillouin's information to conclude that PIH is worth and that it is the mathematical expression of PIH who takes it away from the causation and it doesn't allow to measure the variables required to determine the behavior of a physical system simultaneously, besides linking it strongly with the statistic and with the associated measurability to the observations; it is this statistical indeterminism the one that has moved to the philosophical indeterminism. Also, I conclude that PIH eradicates the causation in quantum world since it cannot determine with accuracy the behavior of an only atomic entity (starting from the group behavior), because there isn't deeper lacks and more complete theoretical developments that allow to modify the risky vision of the nature, and for the state in that he/she is the technology associated to the measurability.

Even this way, and according to quantum theory, PIH shows off like a fundamental law of the nature that promulgates the existence of an objective random, where it is assumed that the randomness underlies in all natural events. We must wait for seeing if this is true, because only the time will say us if PIH is all right or he must be modify.

## Introducción

A lo largo de la historia de la ciencia se han presentado una multitud de eventos que requieren ser explicados y que, debido a su complejidad, han atraído a una gran cantidad de personalidades con distinta formación académica que se ha impuesto la tarea de explicarlos; pero para dilucidar la naturaleza de las cosas han sido necesarias grandes dosis de observación, paciencia e ingenio que, sumadas a un gran poder deductivo, han permitido generar teorías que brindan un acercamiento aceptable con la realidad, de tal suerte que, consideramos, podemos explicar cómo y por qué suceden las cosas en el medio natural. Es así que contamos con conjuntos de leyes y preceptos que han sido organizados lógicamente y nos permiten deducir consecuencias a partir de hechos previos. Más aun, cuando los fenómenos naturales exhiben repetitividad, suponemos que hay causas que son el origen de tales comportamientos, lo que nos ha llevado a proponer que el comportamiento del mundo está determinado de antemano, y que por eso se comporta como lo hace.

Tales suposiciones se afincan principalmente al observar aquellos movimientos que exhiben regularidades y que día tras día observamos en nuestro entorno. No obstante, dentro de tal repetitividad, se observan ligeras desviaciones que se salen del patrón establecido y documentado de manera sistemática; estos accidentes, que modifican el comportamiento habitual de un sistema natural, han llevado a muchas personas a proponer que en vez de pensar en un determinismo fuerte que rige el comportamiento de un sistema, es mejor hablar de regularidades estadísticas donde se cuenta con probabilidades de no ocurrencia del evento tal y como estamos acostumbrados a apreciarlo. Por supuesto la física, en tanto que ciencia que se ocupa de estudiar el comportamiento de los sistemas naturales e indaga cómo, y por qué ocurren las cosas, no se ha mantenido ajena a tales controversias, sino que más bien las ha prohijado. De hecho, fueron las leyes de Newton en la física clásica quienes indujeron la creencia de que la naturaleza se comporta como un mecanismo semejante a un reloj, y que el universo conocido está gobernado por un conjunto de leyes naturales que predice cómo evolucionan los sistemas conforme transcurre el tiempo, pues éstos deben seguir a “pie juntillas” la legislación natural. Más aún, la explicación clásica de la evolución de los eventos ha impuesto como requisito obligatorio que, para el óptimo funcionamiento de tal

normatividad sea necesario que la diacronía de un evento se exprese en términos de una función temporal o de algún otro parámetro cuantificable, que el evento sea continuo –es decir, sin saltos abruptos–, y que exista plena objetividad en su descripción. Sobra decir que los anteriores requisitos se cumplen cabalmente en la física clásica, aun aquéllos en los que se manejan sistemas de muchas partículas, como por ejemplo, los gases; en este tipo de sistemas se introducen valores estadísticos y probabilistas que nos remiten a los valores esperados que asumirán las variables involucradas en la descripción del evento; estos valores son una consecuencia inmediata del principio de equidad al que se someten todos y cada uno de los objetos constituyentes del sistema. La necesidad de emplear la estadística y la probabilidad en estos casos es innegable y efectiva, aunque a veces se juzgue que, tanto la probabilidad como la estadística, no son más que una medida de nuestra ignorancia acerca del comportamiento real del sistema. Debe señalarse, adicionalmente, que en este caso se considera que todas las variables involucradas en la descripción están unívocamente definidas y, aun cuando las entidades son idénticas, se asume que son perfectamente distinguibles, satisfaciendo con ello con el principio de separabilidad. Esta simplificación teórico-estadística introduce una sencillez operacional al modelo que agiliza tanto la visualización del comportamiento del sistema como las operaciones y predicciones que deseemos obtener en todo tiempo, es decir, de alguna manera hemos descrito su comportamiento, y lo hemos hecho, decimos, objetivamente, sin importar que el sistema bajo estudio consista en una distribución discreta o continua de materia. Si a todo lo anterior le sumamos que los procesos a nivel macroscópico son fácilmente cuantificables y que se manifiestan como si existiesen causas plenamente identificadas que ocasionan modificaciones previsibles a los sistemas, es fácil colegir por qué decimos entonces que el modelo teórico, además de ser descriptivo, es explicativo.

Pero con la aparición de la mecánica cuántica se introdujeron en la concepción física ordinaria varios puntos de conflicto, de entre los que sobresalen: la naturaleza discreta de la emisión, absorción y el intercambio de energía a nivel atómico, procesos gobernados por el cuanto de acción representado por la constante de Planck. Enfrentar una naturaleza discreta y encontrarse con serias objeciones para efectuar mediciones directas sobre las entidades atómicas condujo a la teoría cuántica a precisar sus pretensiones y alcances, contentándose con ser una teoría puramente operativa, pues renunció, en principio, a presentar cuadros explicativos de la naturaleza microscópica y se concretó a dar descripciones del acontecer cuántico, aduciendo que a lo más que se puede aspirar es a proporcionar una representación puramente matemática del evento, dado que las

palabras y los conceptos ideográficos con lo que se cuenta no alcanzan para dar razón de las cosas en niveles tan profundos y tan básicos de la naturaleza, debido a que no se tienen a la mano experiencias sensibles de cómo son los objetos atómicos, siendo incluso, imposible diferenciar si tales objetos son corpúsculos u ondas. Esta imposibilidad física de determinar unívocamente qué tipo de entidades físicas elementales son las criaturas cuánticas nos ha llevado a decir que la mecánica cuántica es una teoría en la que se encuentran subsumidos los inobservables.

Otro problema que se yergue en el centro de la teoría es la inexistencia del determinismo pues, de entrada, ya no podemos apelar más que a dar descripciones estadísticas y probabilísticas de los objetos. Pero la probabilidad que aquí aparece ya no es equitativa, como en el caso clásico, al asumir de entrada que un objeto atómico puede encontrarse en un estado cuántico arbitrario –que pudiese ser incluso, conocido– dado que tiene asociada, por la ecuación de Schrödinger, una función de carácter ondulatorio que se ve afectada en cuanto deseemos efectuar una observación. Dicho de otra manera, el objeto posee intrínsecamente el potencial de encontrarse en cualquier sitio de la región donde transite la onda, que a su vez, ha dejado de ser una onda común para alcanzar el rango de onda de probabilidad, onda que se mueve en su espacio de configuraciones. Esto, sin duda, imposibilita una predicción certera como las que se llevan a cabo en la teoría clásica, por lo que el determinismo se ve afectado. Si bien la ecuación de Schrödinger pretende reimplantar el determinismo en la teoría cuántica al proponer una ecuación diferencial semejante a la ecuación de onda clásica, no logra hacerlo totalmente pues la onda resultante es una onda de probabilidad. Los otros problemas que causan un conflicto de gran calibre en la comprensión de dicha teoría son, como ya se mencionó antes, la superposición de dos conceptos mutuamente excluyentes de la física clásica que conforman el objeto atómico: partícula y onda. Esto está dado por el principio de complementariedad de Bohr que, a su vez, se relaciona estrechamente con el principio de incertidumbre de Heisenberg, postulado que enuncia que es imposible medir simultáneamente las variables cinemáticas y cinéticas requeridas clásicamente para dar una descripción completa del estado. Estos dos últimos principios son los que erradican la objetividad de la teoría y la vuelven (una teoría) descriptiva, además de que el principio de incertidumbre parece ser, en primera instancia, el sustento axiomático del indeterminismo subyacente en la teoría, indeterminismo que se fortifica al compararse la mecánica cuántica con la física clásica.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Esto último es el motivo del presente trabajo, es decir, después de un estudio lo más exhaustivo posible respecto del principio de incertidumbre, se pretende ver la manera en que se relaciona el principio de incertidumbre con el indeterminismo, precisando cuáles son los alcances del postulado teórico, y si se limita sólo al ámbito cuántico para que, en caso de no ser así ver si de alguna manera, y en un futuro no muy lejano, pudiese transferirse al ámbito humano, aun cuando pueda ser motivo de agrias polémicas.

Así, en el primer capítulo se proporciona una descripción somera de lo que es el determinismo, y cómo nació. En dicha unidad se proporciona una reseña histórica que muestra la entronización del determinismo, pero enfatizando en el determinismo científico, pues fue sin duda la ciencia física quien impulsó la visión de un mundo mecánico totalmente predecible, inhibiendo incluso la imposibilidad de ocurrencia de accidentes al garantizar que éstos ocurren no porque la naturaleza sea contingente en sí misma, sino que los accidentes son eventos que no podemos predecir porque desconocemos totalmente las condiciones iniciales que determinan la evolución de los sistemas. En el mismo capítulo se habla del indeterminismo y, nobleza obliga, se menciona a Hume y a Popper, por ser figuras representativas de la postura antideterminista.

En el segundo capítulo se lleva a cabo un análisis más profundo y completo del porqué del determinismo, y si aceptamos que éste no existe en el sentido laplaciano, al menos se plantea la posibilidad de que exista un concepto básico que permita establecer una relación natural más profunda entre los sistemas y su medio ambiente, que sería lo que motiva las regularidades estadísticas; tal concepto es el campo o en su defecto, la idea de fuerza. En dicho capítulo se hace un estudio probabilista simple basado en el cociente de momios, tomando un argumento de Popper, en el que se intenta mostrar que la relación causal debe existir, así sea débilmente, para la ocurrencia de un evento o, dicho de otra manera, la ocurrencia de un fenómeno no necesariamente descarta la relación causa-efecto.

El tercer capítulo expone una génesis de la mecánica cuántica, comenzando por los experimentos más emblemáticos que se presentaron y dieron lugar al nacimiento de la teoría cuántica. En esta sección se presentan, aunque de manera superficial, los postulados que emanaron de la declaración de Copenhague, por ser ellos los que conforman la polémica estructura cuántica. No se debe perder de vista que la mecánica cuántica es una teoría dedicada *ex profeso* a solucionar problemas empíricos, y que sus postulados se van adecuando a las necesidades que los experimentos le presentan. Si bien esto ocasiona la conformación de un cuerpo teórico alejado del realismo tradicional,

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

al diluirse la esencia única e indivisible explicativa del acontecer natural, los creadores de la nueva teoría asumen la postura –y con ella, el reto– de otorgarle un carácter meramente operativo o instrumental a la teoría, planteando con ello nuevos desafíos tanto a la ciencia como a la filosofía respecto a si una teoría tiene el deber de explicar los hechos naturales.

En el capítulo cuarto la postulación de similitudes y diferencias conceptuales entre la mecánica matricial de Heisenberg y la mecánica ondulatoria de Schrödinger se hacen presentes. Aquí se expone cómo la teoría matricial se basa en la teoría clásica de Hamilton, mientras que la teoría ondulatoria lo hace en la teoría de Hamilton-Jacobi. Ambas teorías se abocan a resolver, tal y como se ha mencionado con insistencia, la problemática en que deviene la obtención y predicción de los resultados experimentales, aunque utilizan rutas distintas, pues mientras una lo hace solamente apoyándose en la matemática, sin importarle demasiado la significancia conceptual, y aún introduciendo el subjetivismo en la teoría, la otra (la teoría ondulatoria) intenta retomar la idea de la continuidad y objetividad de las entidades atómicas, aun cuando no logra hacerlo del todo. En este capítulo aparece por vez primera la relación que el principio de Heisenberg mantiene con ambas visiones.

El quinto capítulo se enfoca plenamente al principio de indeterminación y el vínculo que mantiene con las mediciones, mostrando la incapacidad que tienen los objetos cuánticos de desligarse del instrumental de medición; con ello, se manifiesta que la incertidumbre que enuncia el principio no nada más se debe a la precisión instrumental, sino también a la latente dualidad de las entidades cuánticas. Aquí se ilustra cómo se establecen nexos que ayudan al soporte mutuo de los principios de Heisenberg y de complementariedad de Bohr. En este capítulo se busca dilucidar por qué la incertidumbre experimental implica la indeterminación filosófica, o viceversa. Una posible consecuencia de esto, motivo de otro trabajo de gran calado que no deja de ser atractivo, es que el principio de incertidumbre de Heisenberg deja, al menos en primera instancia y visto rápidamente, la sensación de que si hay una rendija abierta para que un objeto atómico opte por ser partícula u onda entonces, en caso de poder transferirse (con sus debidos ajustes) al ámbito humano, sería un sólido garante de que la libertad humana existe. Obviamente, se puede soñar que esto pudiera lograrse en un futuro quizá no muy lejano.



# Capítulo 1

## El Indeterminismo

### Introducción

El determinismo es una postura epistémica que sostiene que todo lo que acontece en el mundo está predeterminado previamente. Esto está intrínsecamente relacionado no sólo con las ideas religiosas y metafísicas, sino también con ideas científicas –principalmente en física, sobre todo aquellas que describen los fenómenos desde un punto de vista macroscópico y a bajas velocidades–. Tal punto de vista ha sido sumamente criticado, sobre todo por la concepción denominada indeterminismo.

En este capítulo se examinará brevemente en qué consiste el indeterminismo, haciendo énfasis en el indeterminismo científico y buscando su relación con el Principio de Incertidumbre de Heisenberg, que aparece en la mecánica cuántica.

### 1.1 El determinismo

#### 1.1.1 Aparición en las primeras culturas

Indudablemente que es imposible saber con exactitud el tipo de conocimientos que poseían los hombres primitivos. Sin embargo, y de los pocos legados que se tienen, es evidente que desde los albores del tiempo y como consecuencia de una observación más profunda de su entorno natural, el ser humano ha pretendido hallar una explicación de cómo ocurren las cosas, y por qué ocurren así. Es admisible pensar que en los comienzos de la historia humana, al intentar explicar el acontecer natural mediante métodos observacionales aún deficientes, no se tuviera más opción que acudir a la magia, los ritos y la religión, por ser lo más inmediato y accesible para abordar la ocurrencia de las cosas; con ello se admitía que el mundo es gobernado por poderosas entidades que decidían qué, cuándo, cómo y para qué sucedían las cosas en el mundo; la manera en que se les honraba aparece a lo largo y ancho del orbe mediante diversas representaciones

arquitectónicas y/o pictóricas,<sup>1</sup> representaciones que han subsistido como mudo testimonio de la veneración que el hombre les profesaba.

Ahora bien, hace aproximadamente 5000 años comenzaron a aparecer,<sup>2</sup> después de un sinnúmero de observaciones y técnicas empleadas pasajeramente, las primeras ideas que representaron una tentativa de la civilización para indagar cuál era el orden subyacente en un medio tan hostil como lo era el medio natural; con el sedentarismo, y conforme las diversas comunidades agrícolas y la domesticación de los animales se desarrollaban, fue imperioso predecir con certeza la mejor época del año para sembrar las semillas y aumentar el ganado; sin duda, la observación continua de la bóveda celeste contribuyó grandemente a realizar predicciones acertadas la mayoría de las veces, y el estudio cada vez más minucioso del movimiento de las estrellas y los planetas permitió confeccionar calendarios altamente precisos que determinaban el momento exacto de la siembra, teniendo siempre como única finalidad la maximización de la cosecha.

Fue una observación más meticulosa y sistemática del medio ambiente lo que evidenció la regularidad de muchísimos fenómenos naturales, permitiendo con ello generar algunos de los primeros intentos explicativos del hombre de esas épocas; dentro de tales fenómenos repetitivos descuellan, por su trascendencia e impacto en la evolución de las sociedades, los movimientos periódicos, como por ejemplo, los equinoccios y solsticios, motivo de gran interés principalmente para los agricultores. Son también excelentes ejemplos –por su pasmosa precisión–: las predicciones de las crecidas del Río Nilo, en el caso de la cultura egipcia; las predicciones que aparecen en los escritos babilónicos acerca del movimiento aparente de la Luna y los planetas respecto a las estrellas fijas; igualmente, en otras latitudes se tienen vaticinios de la llegada de los monzones y las lluvias de estrellas, etc. Sin embargo, es viable asegurar que en ningún

---

<sup>1</sup> Tal podría ser el caso de las pinturas rupestres encontradas en diversas partes del mundo, siendo las más célebres las encontradas en España y Francia. En lo que respecta a la arquitectura, y con toda la controversia que existe acerca de su intencionalidad –de si es santuario, tumba u observatorio– sobresalen Stonehenge y los monolitos de la Isla de Pascua.

<sup>2</sup> Aquí se ha considerado este dato pues, aunque no se cuenta con datos fidedignos, al menos se estima que las civilizaciones antiguas se establecieron alrededor de tales épocas, pues: “A principios del cuarto milenio antes de la era cristiana aparecieron los primeros asentamientos de agricultores sedentarios; en la fértil región del valle del Huanghe surgió la civilización neolítica de Yang Shao, caracterizada por una cerámica pintada, por el perfeccionamiento de las técnicas agrícolas y por la domesticación de animales” (*Enciclopedia Hispánica*; Encyclopaedia Britannica Publishers, Inc. USA. 1995-1996. Tomo 5. p. 55); igualmente, “A principios del segundo milenio, varios pueblos de origen semita procedentes del oeste se asentaron en Babilonia”. (*Idem*. Tomo 2. p. 278). Es de suponer entonces que entre los 6 000 y 5 000 años comenzó una observación más profunda de la naturaleza.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

momento se tiene documentado un intento verdaderamente serio de comprender y explicar la ocurrencia de tales fenómenos. Por el contrario, se adoraba a las fuerzas de la naturaleza como si fuesen dioses o bien, como si estuviese gobernada por un principio de uniformidad natural; dicho de otra manera, era indispensable contar con un demiurgo de cabecera pues él era el motivo y la causa del acontecer natural. Buen ejemplo de esto aparece en la Biblia cuando el pueblo hebreo, al creerse abandonados por Yahvé, suplica a Aarón les construya un dios que “vaya delante de nosotros, porque ese Moisés, el hombre que nos ha sacado de la tierra de Egipto, no sabemos qué ha sido de él.”<sup>3</sup> Es evidente entonces que los dioses juegan un papel trascendental para los hombres por ser ellos quienes dictan el comportamiento de la naturaleza, no importando que sus decisiones estén lejos de la comprensión de los humanos que, obsecuentemente, deben acatar sus mandatos. Se vislumbra así una relación causal de naturaleza divina que determina la ocurrencia de los eventos en el mundo natural.

### **1.1.2 En la cultura griega**

El desarrollo de las artes, la filosofía y la ciencia entre los griegos favoreció observaciones y cuestionamientos más escrupulosos del acaecer natural –a pesar de seguir vigente la explicación teológica–, impulsando así la reflexión y la abstracción racional como el motor generatriz de conocimiento, lo que a su vez, se impuso como condición necesaria para poder aspirar a explicar la realidad. Es a los grandes artistas y pensadores griegos a los que la historia les ha asignado el papel de precursores no sólo del pensamiento filosófico y científico, sino también de la cultura occidental moderna. Es a ellos a quienes se les atribuye el desarrollo de una reflexión más profunda, sistemática y racional que intenta dar una explicación al por qué de las cosas.

Y es que, tal y como se señaló previamente, en las culturas antiguas la primera explicación convincente que da cuenta de la existencia del hombre es la religiosa –que casi siempre aparece ligada a la literatura–,<sup>4</sup> y los griegos no son la excepción. De la literatura griega perduran las historias de los rapsodas y las obras de teatro –de entre las que descuellan las de carácter trágico de Homero, Sófocles y Esquilo– en las que se detalla cómo algunos personajes se ven obligados a cumplir su cruel destino. Estas

---

<sup>3</sup> La Biblia. Ex. 32.1.

<sup>4</sup> Por ejemplo: Los Vedas, el Ramayana, la Odisea de Gilgamesh, la Biblia, el Popol Vuh, etc.

bellísimas manifestaciones literarias pretenden mostrar que todo lo que ocurre en la naturaleza ha sido previamente determinado por potencias suprahumanas y cómo los personajes se ven obligados a seguir puntualmente el derrotero que se les ha asignado. Así, el destino resulta ser un camino rígido donde todo prefigura dispuesto de antemano. Aparece entonces el determinismo literario.

¿Pero qué es el determinismo? ¿Cómo se lo puede definir? En la introducción del libro *A Primer on Determinism*,<sup>5</sup> donde realiza un estudio acerca del determinismo (o indeterminismo) y su trascendencia e impacto en el conocimiento humano, Earman dice que el

Determinism is a perennial topic of philosophical discussion. Very little acquaintance with the philosophical literature is needed to reveal the Tower of Babel character of the discussion: some take the message of determinism to clear and straightforward while others find it hopelessly vague and obscure; some take determinism to be intimately tied to predictability while others profess to see no such bond; some take determinism to embody an a priori truth, others take it to express a falsehood, and still others take it to be lacking in truth value; some take determinism to undermine human freedom and dignity, others see no conflict, and yet others think that determinism is necessary for free will; and on and on.<sup>6</sup>

Es así que, como tal autor admite, tal término resulta susceptible de verse envuelto en la polémica, pues hay quien está convencido de que el mundo es determinista mientras que hay quien sostiene la tesis contraria. Y es que el determinismo se asocia fuertemente con la manera que tenemos de ver la naturaleza y de vislumbrar el futuro al suponer que nuestras acciones presentes dictarán cómo será el porvenir. Esto es algo que se deriva del consuetudinario roce que tenemos con el mundo, donde observamos que la naturaleza no presenta modificaciones sustanciales respecto a la historia pasada; es decir, notamos que funciona en “forma normal”,<sup>7</sup> pues todo lo que nos rodea se comporta

---

<sup>5</sup> Earman, J. (1986): *A primer on determinism*; D. Reidel Publishing Company; Netherlands.pdf. 1986.

<sup>6</sup> *Ibid.*, p. 1.

<sup>7</sup> Hacking alude a la “normalidad” como la palabra asociada a la distribución normal o gaussiana en la estadística y su vasto uso en la recolección de datos aleatorios con resultados numéricos en la ciencia, por ejemplo, en la teoría de errores; normal se refiere entonces a aquellos eventos que pueden representarse mediante una función de densidad normal y que dan como gráfico una función de distribución normal, gaussiana o campana de Gauss. El estado normal, en el sentido en que Hacking lo maneja es que, aproximadamente, 95% del área bajo la curva representa la mayoría de los datos recolectados (que se encontrarían en el intervalo:  $(x_{medio} - 2\sigma, x_{medio} + 2\sigma)$ ; el 5% restante, distribuido por mitad a ambos extremos de la campana representarían la anormalidad de los datos muestrales recopilados. Hacking asegura que «lo normal preserva el *statu quo* [...]» (p. 242) y que es lo opuesto de lo patológico o raro, y: «la normalidad es, como el determinismo, una idea que en cierto modo estuvo siempre en nosotros, pero que en algunos momentos puede adoptar una forma de vida completamente nueva. [...] Como palabra, “normal” es mucho

de manera aproximadamente igual a como lo ha hecho previamente, donde este aproximadamente significa que no esperamos que hoy sea exactamente igual que ayer o que mañana pues el mundo sería estático; son, nos lo dice la experiencia, precisamente estas ligeras variaciones lo que le dan el carácter de alta dinamicidad que conocemos. Sin embargo, la mayoría de las veces –y a nivel macroscópico– tal dinámica puede ser predicha. Por eso es que admitimos pequeñas variaciones en el comportamiento natural, aunque estamos conscientes que los accidentes ocurren con –quizá demasiada– frecuencia, pero solemos pasarlos por alto siempre y cuando no causen estragos en nuestro entorno. Esta constancia variacional ha hecho posible que los seres vivos desarrollen rutinas en su vida cotidiana, y en el caso específico de las sociedades humanas, la idea de una repetitividad (casi) invariable subyacente en la naturaleza ha impulsado, por un lado, el desarrollo de las civilizaciones y permitido, por otro, asimilar etapas transitorias –sobre todo las dolorosas– con cierta resignación, pues siempre subsiste la creencia que todo volverá al estado “normal” previo al suceso. Más aún, quizá sea la resignación quien nos induce a creer que inclusive los accidentes han sido determinados previamente por una entidad superior; el fatalismo encuadrado en la frase: “dios sabe por qué suceden las cosas” lo dice todo.

Quien esto escribe piensa que la palabra ‘determinismo’ pudo haberse originado, como antes se dijo, en la literatura –de donde pasó a la religión–, pues es allí donde cobra sentido, dado que la vida y evolución de los personajes de una obra literaria quedan perfectamente “determinadas” de acuerdo a la trama y a las características físicas y psicológicas que les haya asignado el autor. Es así que un lector, o espectador, de la obra (en caso de ser teatro o cine) puede comprender cómo las vidas de los personajes siguen una senda trazada de antemano, es decir, su vida está literalmente “determinada”; quizá el caso más conocido sea la tragedia de Edipo, quien después de saber lo que el Oráculo de Delfos ha vaticinado, busca infructuosamente evadir su sino para caer,

---

más antigua, pero adquirió su más común significación actual sólo en la década de 1820. [...] Lo normal era un concepto de un par de conceptos. Su opuesto era lo patológico y durante breve tiempo su dominio fue principalmente médico. Luego pasó a casi todas las esferas, la gente, la conducta, los estados de los negocios, las relaciones diplomáticas, las moléculas. Todas las cosas pueden ser normales o anormales. La palabra se hizo indispensable porque creaba cierta “objetividad” en lo tocante a los seres humanos. La palabra es también como un fiel criado que nos habla del pasado. [...] Normal lleva el sello del siglo XIX y de su concepción del progreso, así como “naturaleza humana” lleva el sello de la ilustración». (pp. 231-232). Igualmente expresa que: «Puede uno, pues, usar la palabra “normal” para decir cómo están las cosas, pero también para decir cómo debieran ser. [...] La norma puede ser lo que es usual o típico» (p. 235). (Citas de: Hacking, I. (1995); *La domesticación del azar. La erosión del determinismo y el nacimiento de las ciencias del caos*; Ed. Gedisa. España).

irremisiblemente, en él. Es de aquí de donde se pudo haber tomado taxativamente, y en primera instancia, el determinismo como la relación causal llevada a sus extremos; posteriormente, dicho vocablo se trasladó a la filosofía, la ciencia y a la esfera humana en general donde, incluso, se vinculó con la libertad.<sup>8</sup> Quizá sea por esto que, sin tener una definición única, precisa y clara, convencionalmente “Se llama determinismo a la teoría filosófica según la cual todos los acontecimientos del universo están completamente fijados por leyes naturales de tipo causal.”<sup>9</sup>

Ferrater Mora se expresa de manera análoga al asegurar que: “Suele definirse el determinismo como la doctrina según la cual todos y cada uno de los acontecimientos del universo están sometidos a las leyes naturales. Estas leyes son de carácter causal”.<sup>10</sup>

Igualmente, la *Enciclopedia Encarta* expone, en términos generales, que el determinismo es la

doctrina filosófica que afirma que cualquier acontecimiento, mental o físico, responde a una causa, y así, una vez dada la causa, el acontecimiento ha de seguirse sin posible variación. Esta teoría niega cualquier posibilidad al azar o a la contingencia. Se opone con la misma radicalidad al indiferentismo o indeterminismo, que mantiene que en aquellos fenómenos relacionados con la voluntad humana, los acontecimientos precedentes no determinan de un modo definitivo los subsiguientes.<sup>11</sup>

Para otros autores, el determinismo es,

Intuitively, the view that the past uniquely determines the future. Laplace characterised determinism as lawful predictability. [...] Freed from the epistemic notion of predictability, determinism is taken to be a claim about universal causation: each and every event has a fully sufficient nomological condition (i.e., a sufficient cause in accordance with universal laws). Determinism, then, denies the existence of objective chance in the world: all events are determined to happen with either probability one or zero.<sup>12</sup>

---

<sup>8</sup> De hecho, Popper hace el señalamiento de que el determinismo coarta la libertad, al proferir: “Hasta casi 1927 los físicos, salvo contadas excepciones, creían que el mundo era un inmenso reloj sumamente preciso. Descartes [...] describió el reloj como algo mecánico: toda causalidad era empuje. Tal fue la primera y más clara teoría de la causalidad. Tiempo después, aproximadamente a partir de 1900, el mundo pasó a ser considerado como un reloj eléctrico. Mas en ambos casos se consideraba que el mundo era un reloj sumamente preciso. [...] En tal mundo no quedaba lugar para las decisiones humanas. Nuestras sensaciones de estar actuando, planeando, comprendiéndonos mutuamente, eran ilusorias. Pocos filósofos, con la gran excepción de Peirce, osaron disputar esta concepción determinista. En 1927, con Werner Heisenberg, la física cuántica experimentó un gran cambio. Quedó claro que procesos ínfimos convertían al reloj en algo impreciso: existían indeterminaciones objetivas.” (Popper, K. (1990): *Un mundo de pensiones*; Ed. Tecnos. Madrid. 1992. pp. 22-23).

<sup>9</sup> *Enciclopedia Hispánica*. Vol. 5. p. 149.

<sup>10</sup> Ferrater Mora, J. (1964).pdf: *Diccionario de filosofía. Tomo I: A-K*; Ed. Sudamericana. Buenos Aires. p. 418.

<sup>11</sup> *Enciclopedia Encarta*; Microsoft 2000.

<sup>12</sup> Psillos, S. (2007).pdf: *Philosophy of science A-Z*; Edinburgh University Press; G. B. p. 67.

Earman, por su parte, al pretender clarificar qué es el determinismo, dice:

Perhaps the most venerable of all the philosophical definitions holds that the world is deterministic just in case every event has a cause. The most immediate objection to this approach is that it seeks to explain a vague concept –determinism– in terms of a truly obscure one –causation–.<sup>13</sup>

Se vuelve evidente, a partir de los argumentos anteriores, que el determinismo descansa en la relación causal y propende a las leyes naturales, introducidas mediante un proceso inductivo que se deriva de observar cómo un conjunto de eventos naturales se comportan, aproximadamente, de manera análoga bajo las mismas circunstancias; tal regularidad surgida de la observación se eleva a rango de ley y se asume como evidente para todos los observadores. Dicha ley sería, en términos concisos y puntuales, la expresión verbal que enuncia la regularidad estadística llevada al límite, es decir:

si: *regularidad estadística* =  $nx$ ,

con:  $x :=$  *evento bajo estudio*,  $n$  = número entero,

entonces:

*ley natural* :=  $\lim_{n \rightarrow \infty}(\text{regularidad estadística})$ .

Cabe hacer mención aquí de que la ley natural, además de la regularidad estadística, contempla tácitamente principios de simetría en lo referente a transformaciones espacio-temporales, pues son dichos principios quienes determinan la invariancia de las leyes físicas bien sea bajo traslaciones o bajo rotaciones, lo que garantiza su validez en el universo conocido.

La regularidad estadística tiene dos vertientes: por un lado, nos conduce a un determinismo causalista, que es aquél en que después de considerar un número muy grande de observaciones –bajo condiciones constantes e iguales– notamos que éstas son estables o se mantienen sin variabilidad estadística significativa (no se alejan mucho del valor considerado estable), lo que a su vez nos conduce a una probabilidad de ocurrencia

---

<sup>13</sup> Earman, J. (1986): *A primer on...* p. 5

unitaria –evento certero–. En el otro caso, si se presenta variabilidad estadística significativa, podremos hablar de un determinismo probabilista.

Así, pareciera ser que las leyes naturales son resultado de, en primera instancia, extrapolaciones justificadas mediante un proceso (incluso lógico) de inducción que contienen evidencias empíricas derivadas de fenómenos naturales –sean controlados (experimentos) o no– que nos permiten establecer principios más generales y fundamentales, que inclusive representamos simbólicamente, y que nos llevan a asignarlos al comportamiento natural. Si bien se puede objetar que dichas observaciones, por ser de naturaleza sensible, pueden no explicar verdaderamente las cosas, aún así podemos encontrar el sucedáneo a tal problemática al ponernos de acuerdo y fijar posibles “parámetros de realidad” que nos sirvan como acotamiento de hasta dónde es válido y admisible considerar que ‘explicamos’ la realidad, puesto que ésta, formalmente hablando, no sabemos bien a bien qué sea; es esta “limitación parametrizada” de la realidad lo que nos permite matematizarla y considerar que esta “realidad modelada” matemáticamente suplanta en su totalidad a la “realidad real” por lo que pocas veces dudamos de que sean distintas. Más aún, al considerar como válida tal realidad matematizada, implícitamente asentimos que la realidad se relaciona con los procedimientos lógico formales propios de la matemática, admitiendo tácitamente con ello que también es susceptible de ser demostrada (matemáticamente). Sin embargo, este método de abordar la realidad a veces es cuestionado porque se aduce que se demuestra la simbología con que representamos las cosas, pero no las cosas mismas (por ejemplo, en este sentido procede la mecánica cuántica, que se fundamenta más en la matemática que en los conceptos porque ya no alcanzan ni los sentidos, ni las palabras o la imaginación para describir el acontecer atómico). Así que estamos entrampados con el concepto de realidad que tenemos, y si no podemos subirnos a él mediante conceptos ideográficos, experiencias sensibles o vía expresiones simbólicas, ¿cómo explicamos entonces los acontecimientos? Es de suponerse que una buena tentativa para salir de este embrollo es que fijamos los “parámetros de realidad”, que son aquellos hechos que la mayoría de las personas (la normalidad de Hacking) aceptamos como válidos. En física, son estos “parámetros de realidad” quienes constriñen la realidad al llevarla de una realidad trascendente a una realidad física, a la par que nos permiten centrarnos en qué observar –es decir, qué características de los cuerpos nos interesa estudiar– y cómo ‘observamos y explicamos’ la realidad. Asimismo, esta “reducción de la realidad” mediante

la imposición de determinadas variables a considerar (los “parámetros”) posibilita llevar a cabo observaciones reproducibles y cuantificables que después buscamos representar matemáticamente. Claramente, hay experiencias que siempre están presentes en todo proceso de observación y medición, pero que no podemos cuantificar aun cuando las consideremos como reales, por ser características propias de cada observador –v. g.: sentimientos, emociones, grado de intuición, inteligencia, etc.– Sin embargo, bajo la fijación de los parámetros de realidad que hacemos, adquirimos certezas y cierto conocimiento que, esgrimimos retóricamente, tiende a ser independiente del observador y puede repetirse para llegar, aproximadamente, a los mismos resultados. En este caso, decimos que somos observadores objetivos e imparciales.

Pero además, las leyes naturales –que a veces suponemos que están allí, listas para ser encontradas– poseen una gran virtud: son simplificadoras metodológicas, pues son susceptibles de verificación experimental y se emplean como justificantes de la relación causal, brindándonos con ello la posibilidad de seguir, en términos funcionales, el comportamiento del sistema en todo tiempo, proporcionándonos con ello la enorme ventaja de pronosticar y comprender su evolución (del sistema), pues lo vuelve fácilmente visualizable e incluso, lógicamente justificable.<sup>14</sup> Existen, no obstante, varias objeciones a lo que es una ley –dependiendo de si es observacional o se deriva de una teoría–, en cuyo caso debería enfatizarse el método del cual emana; Bird lo enuncia con toda propiedad al exponer que

Laws need to be distinguished from statements of laws and from our theories about what laws there are. Laws are things in the world which we try to discover. In this sense they are facts or are like them. A statement of a law is a linguistic item and so need not exist, even though the corresponding law exists (for instance if there were no people to utter or write statements). Similarly, theories are human creations but laws of nature are not. The laws are there whatever we do—one of the tasks of the scientist is to speculate about them and investigate them. A scientist may come up with a theory that will be false or true depending on what the laws actually are. And, of course, there may be laws about which we know nothing.<sup>15</sup>

En el caso de las leyes naturales, es indiscutible que se refiere a enunciados observacionales. Aún así, frecuentemente se pone en entredicho la validez de la relación causal –y con ello, de la ley natural– dado que dicha relación puede no ser más que una justificación lógica que se asigna a la ocurrencia de los eventos. Sin embargo, legislar el

---

<sup>14</sup> En este caso, pienso en el proceso de inducción matemática, de ahí la logicidad.

<sup>15</sup> Bird, A. (1998): *Philosophy of Science*; Fundamentals of Philosophy. Series Editor: John Shand. University of Edinburgh. Routledge. Taylor & Francis Group. pdf. p. 17.

comportamiento de los sistemas naturales es el primer gran paso que se debe dar para comprender la ocurrencia de los sucesos, pues sólo nos abocamos a analizar las regularidades por ser ellas las que se pueden modelar; los eventos azarosos, en tanto que únicos e irrepetibles no pueden modelarse, quedando sólo como un caso anecdótico o curioso al ser un evento aislado. Max Planck, ejemplifica perfectamente esto que expongo, al decir:

¿Cómo descubrimos las leyes de la Física y cuál es su naturaleza? Debe ser remarcado, para empezar, que no tenemos ningún derecho de asumir que alguna ley física existe, o que si ha existido hasta ahora, existirá para siempre en el futuro. Es perfectamente concebible que un buen día la Naturaleza producirá un evento que nos sorprenderá a todos; y si esto llegara a pasar estaríamos a merced de tal evento, aun si el resultado fuera tal que, a pesar de nuestros empeños, falláramos en introducir orden en la confusión restante. En tal evento, la única ruta abierta a la ciencia sería declararse en bancarota. Por esta razón, la ciencia es impelida a empezar por la suposición muy general de que una regla general domina a través de toda la naturaleza.<sup>16</sup>

Es comprensible entonces por qué el determinismo, y quizá aún más la relación causal, comienza a afincarse en el pensamiento humano como un mecanismo explicativo, a tal grado que ha sido, en términos generales, parte fundamental de la física clásica. Sin embargo, como hemos visto líneas arriba, dar una definición clara y sencilla de lo que es el determinismo es sumamente difícil, siendo quizá la “definición” más socorrida lo propuesto por Laplace:

Todos los sucesos, hasta aquellos que a causa de su insignificancia no parecen seguir las grandes leyes de la naturaleza, son el resultado de ellas tan exacta y necesariamente como las revoluciones del sol [...] Supongamos por un instante el caso de una inteligencia que pudiera abarcar todas las fuerzas en virtud de las cuales la naturaleza está animada y la situación respectiva de los seres que la componen –una inteligencia suficientemente vasta para someter a análisis estos datos–, ella debería comprender en la misma fórmula los movimientos de los mayores cuerpos del universo y los movimientos del más ligero átomo; para ella, nada sería incierto y el futuro y el pasado serían el presente a sus ojos.<sup>17</sup>

Como se ve, lo propuesto por Laplace subraya como atributos esenciales del determinismo no sólo la capacidad de predecir unívocamente el acontecer de los eventos en el universo, sino también la manera en que la predicción descansa totalmente en lo necesario de la ocurrencia, es decir, el hombre, al desconocer cuál es la estructura real de la naturaleza se ve impelido, de acuerdo con su vocación inquisitiva y racional, a imponer

---

<sup>16</sup> Félix Valdez, J. (2001): *La mecánica cuántica*. 1ª Ed.; Colección Nuevo Siglo. Serie Ciencia y Tecnología. Universidad de Guanajuato. SEP. 2001. p. 99.

<sup>17</sup> Hacking., *op. cit.*, p. 32.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

una condición lógica (necesaria y suficiente) a la ocurrencia de los eventos, obligando que la causa anteceda, *a fortiori*, a la aparición del efecto y a que éste acontezca sólo si se dio antes aquélla. De hecho, ha sido este sencillo método observacional, más la compilación, organización y pre-visualización de los acontecimientos naturales –aunado a la continuidad de los eventos y a su fácil medición– lo que ha permitido al ser humano, a través de su historia, explicar una amplia gama de fenómenos mediante la implantación de leyes naturales, y aún cuando hay quienes como Hacking o los físicos de la mecánica cuántica objetan su existencia al argüir que las leyes son de naturaleza estadística, se les ha admitido en casi todas las ciencias por su sencillez explicativa y su alto grado de confiabilidad. Y es que el determinismo como elemento explicativo goza de atributos que lo vuelven un elemento imprescindible dentro de las ciencias, pues:

- ❖ Debido a la repetitividad del evento, es común suponer que para que un suceso ocurra repetidamente, debe haber, al menos, un evento previo. Esto hace posible adquirir cierto grado de conocimiento, aunque no sea científico, que dé respuesta al acontecimiento observado. Por ejemplo, el augurio de un campesino acerca de si lloverá o no es un buen ejemplo: él se fija en la negrura del cielo debido a la cerrazón de las nubes, y quizá inconscientemente, en condiciones de humedad relativa, de cambios de presión, de una baja de temperatura, etc. para pronosticar si habrá o no lluvia.
- ❖ La suposición de una relación causa-efecto facilita la observación de determinado evento, y permite optimizar el uso de recursos para que el estudio sea lo más efectivo posible.
- ❖ La “capacidad explicativa” que una teoría determinista brinda suele ser, lógicamente hablando –y en términos generales– más amplia, certera y convincente que la respuesta que se da en términos probabilistas del mismo evento.
- ❖ Es más sencillo representar ideográficamente un evento repetitivo constante (sujeto a la idea del determinismo) que un evento puramente aleatorio. Por ejemplo, si soltamos una manzana cerca de la superficie terrestre, estamos seguros que caerá. La representación ideográfica del evento sería un brazo dejando caer libremente una manzana en las vecindades de la superficie terrestre.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- ❖ La representación del evento bajo estudio es más fácilmente modelable matemáticamente. La expresión parametrizada suele utilizar el tiempo como parámetro esencial, aunque también pueden emplearse variables de estado.
  - ❖ La concordancia entre lo predicho por el modelo y la ocurrencia del evento puede ser confrontada, tanto empírica como lógicamente, mucho más fácilmente y en un tiempo muchísimo menor que cuando se manejan cuestiones aleatorias.
  - ❖ La extrapolación e intrapolación del evento es más accesible en un evento en el que (suponemos) predomina la relación causal que en un evento puramente aleatorio.
  - ❖ Una teoría determinista permite inferir unívocamente cuál será, y por qué, el comportamiento del sistema y del entorno con suma facilidad; con ello, una teoría determinista se constituye como una teoría predictiva, además de explicativa. En un evento aleatorio es imposible predecir o retrodecir con certeza su comportamiento; en este caso, la predicción será probabilista (o “probabilísticamente explicativa”, apelando a la explicación teórica) y no explicativa (en el amplio sentido de la palabra), en caso de compararse con la teoría determinista.
  - ❖ El determinismo confiere mayor valor estético a una teoría que utiliza la causalidad como elemento explicativo que a aquella que no lo hace; comúnmente, el andamiaje matemático basado en el causalismo suele ser más sencillo y bello que el de las teorías que no son deterministas, pues en éstas el entramado matemático tiende a ser, por novedoso, más difícil en todos los aspectos.
  - ❖ El determinismo permite imponer, sólidamente, orden al comportamiento natural (aunque en casos extremos, al cuestionar de dónde proviene o el por qué de tal orden, se pueda caer en explicaciones animistas). La teoría probabilista, por el contrario, no necesariamente introduce orden –a menos que se considere la diacronía de los sucesos– pues sólo se basa en las regularidades estadísticas.

Los presupuestos anteriores podrían ayudar a comprender el porqué del pensamiento imperante en las civilizaciones antiguas y, más recientemente, el proceder de los científicos y filósofos griegos –proverbial imagen del cuestionamiento y la reflexión– quienes, para buscar una explicación al por qué de los eventos en el medio natural y fuera de los ámbitos literario y religioso, se vieron en la necesidad de llevar a cabo observaciones más meticulosas –aunque en su mayoría fuesen cualitativas– de la

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

naturaleza, lo que a fin de cuentas les condujo a teorizar con el afán de comprender su funcionamiento.<sup>18</sup> Para lograr su cometido procedieron lógicamente, agrupando objetos por medio del reconocimiento de características afines o esenciales y fijándose en la repetitividad de los eventos y observando qué factores varían y cuáles permanecen constantes, considerando entonces que tales elementos deben ser las causas más sencillas e indispensables para la ocurrencia de los eventos, lo que se traduce en la suposición de una legislación natural, algo similar a lo que opina Bohm:

To come to causality, the next step is then to note that as we study processes taking place under a wide range of conditions, we discover that inside of all of the complexity of change and transformation there are relationships that remain effectively constant [...] Rather, we interpret this constancy as signifying that such relationships are necessary, in the sense that they could not be otherwise, because they are inherent and essential aspects of what things are. The necessary relationships between objects, events, conditions, or other things at a given time and those at later times are then termed causal laws.<sup>19</sup>

Con el filósofo presocrático despierta la vocación explicativa propia de la filosofía y la ciencia, pues basado en agudas observaciones y especulaciones “se enfrenta con la naturaleza con una pregunta teórica: pretende decir qué es.”<sup>20</sup> Esto lleva, por ejemplo, a Thales de Mileto a aventurar que el agua constituye la materia universal, pues sin agua no hay vida. Del mismo modo, Anaximandro introdujo el concepto de sustancia primera (*ápeiron*) con la propiedad de ser intangible e impalpable, en tanto que Anaxímenes propuso al aire como sustancia primera. Mención especial merecen Pitágoras y sus seguidores pues dotan de realidad sensible a los números y las figuras geométricas; pese a que son los primeros en reconocer las diferencias cuantitativas de las cosas --base para la descripción física de un evento--, y pese al manejo del álgebra, la trigonometría y a comenzar con estudios astronómicos,<sup>21</sup> no hay indicios de que hayan establecido una correspondencia uno a uno entre los objetos matemáticos y los objetos materiales; de

---

<sup>18</sup> Con los filósofos y científicos griegos se cumple, efectivamente, la máxima aristotélica de que “todos los hombres tienden por naturaleza a saber”. (Marías, J. (1941): *Historia de la filosofía*. 30<sup>a</sup> Ed.; Biblioteca de la Revista de Occidente. Madrid. 1978. p. 60).

<sup>19</sup> Bohm, D. (1957): *Causality and chance in modern physics*; Taylor & Francis e-Library; 2005. p. 1

<sup>20</sup> Marías. *Historia de...*, p. 12.

<sup>21</sup> *Ibid.*, p. 18. Se menciona a Ecfanto de Siracusa, uno de los primeros astrónomos griegos. En wikipedia se menciona que “fue un filósofo griego antiguo seguidor de la escuela pitagórica. Vivió alrededor del año 500 AC; fue discípulo de Pitágoras [...] Rehizo las teorías de Demócrito y Anaxágoras. Fue el primero en reconocer la rotación de la Tierra alrededor de su eje de oeste a este. Para él, el universo es la unión de los cuerpos invisibles separados por el vacío; los átomos o partículas tienen forma, tamaño y poder, y su movimiento se debe a una fuerza derivada de la mente y el alma.” ([http://it.wikipedia.org/wiki/Ecfanto\\_di\\_Siracusa](http://it.wikipedia.org/wiki/Ecfanto_di_Siracusa))

haberlo hecho, hubiesen llegado a representar esquemática o numéricamente la realidad natural, desembocando en lo que actualmente denominamos modelaje matemático. No lo hacen porque para los pitagóricos los números, más que entidades ideales, son la verdadera “esencia de las cosas”<sup>22</sup> y no una mera representación de ellas; les atribuyen existencia real, más verosímil incluso, que los demás objetos del mundo material, y les asignan un “sitio” dentro de la naturaleza; para ellos, los números, a pesar de

no ser corporales [...] tienen realidad y presentan resistencia al pensamiento [...] son la esencia de las cosas; los entes son por imitación de los objetos de la matemática; en algunos textos afirman que los números son las cosas mismas.<sup>23</sup>

Es fácil inferir que al considerar a la naturaleza representada por números, los pitagóricos asumen que la realidad natural está sujeta a la normatividad lógico deductiva como la que impera en la matemática; quizá por eso no se preocupan por matematizar la naturaleza, pues para ellos la realidad y la matemática son uno y la misma cosa, lo que es causa y motivo que los humanos –y quizá las demás especies– sean propensos a pensar lógicamente. Así pues, es factible preguntarse si los pitagóricos no dieron por sentado la existencia de un determinismo subsumido en las entrañas del mundo natural.

Por su parte, Heráclito de Efeso introdujo la idea de fuego etérico y de una naturaleza completamente dinámica; enseñó que la alternancia perpetua de los opuestos entretiene el ritmo perpetuo del fuego siempre viviente, llegando a su fórmula: *panta rei* (todo fluye). Propuso la reflexión profunda como método de investigación, para encontrar la verdad sobre el *logos* universal. Para Anaxágoras de Clazomene el universo fue, en primera instancia, un lugar de innumerables semillas (*spermata*) u “objetos infinitesimales, que poseen, cada uno, una de las cualidades perceptibles y capaces de mezclarse y separarse”;<sup>24</sup> es a tal recipiente de semillas al que el espíritu dio orden y forma debido a un movimiento rotatorio. Parménides aseguró que nada sale de la nada y que la destrucción es imposible, pues la sustancia se desvanecería en nada. Propuso también la imposibilidad del cambio, concluyendo que debe encontrarse una esencia común en las cosas, además de que

Con Parménides, la filosofía adquiere su verdadera jerarquía y se constituye en forma rigurosa. Hasta entonces, la especulación griega había sido cosmológica, física, con un propósito y un método

---

<sup>22</sup> Marías, *op. cit.*, p. 17.

<sup>23</sup> *Ibid.*, p. 17.

<sup>24</sup> Grenet, P. B. (1963): *Ontología*. Curso de Filosofía tomista, Vol. 3; Ed. Herder. Barcelona. 1985. p. 33

filosófico; pero es Parménides quien descubre el tema propio de la filosofía y el método con el cual se puede abordar. En sus manos la filosofía llega a ser metafísica y ontología; no va a versar ya simplemente sobre las cosas, sino sobre las cosas *en cuanto son*, es decir, como *entes*.<sup>25</sup>

Zenón de Elea, padre de la dialéctica, intentó desacreditar mediante argumentos lógicos la imposibilidad del movimiento; tales razonamientos –aporías o paradojas– son problemas “trucados” (de naturaleza matemática, pues involucran el concepto de límite) que conducen al absurdo. Empédocles de Agrigento consideró “cuatro «raíces», cuya mezcla da la apariencia de cualidades nuevas”;<sup>26</sup> son tales elementos los constituyentes de las cosas: agua, aire, tierra y fuego, además de que consideró dos fuerzas de carácter divino: una de atracción y otra de repulsión. Empédocles aseguraba que la materia es imperecedera y afirmó que la luz tiene una velocidad finita. Empero, es con Leucipo –de quien se duda de su existencia–, iniciador de la escuela atomista mecanicista, con quien comienza a aparecer la relación de causa-efecto en las incipientes digresiones científico-filosóficas, pues propone que “nada sucede por casualidad, sino al contrario, todo tiene una causa necesariamente”.<sup>27</sup> Y más aún:

Según Aristóteles y Teofrasto, Leucipo formuló las primeras doctrinas atomistas, que serían desarrolladas por Demócrito, Epicuro y Lucrecio: la consideración racional y no puramente empírica de la naturaleza; la consideración del ser como múltiple, material, compuesto de partículas indivisibles (átomos); la afirmación de la existencia del no-ser (vacío), y del movimiento de los átomos en el vacío; la concepción determinista y mecanicista de la realidad; y la formación de los mundos mediante un movimiento de los átomos en forma de torbellino, por el cual los más pesados se separan de los más ligeros y se reúnen en el centro formando la Tierra.<sup>28</sup>

El sucesor –si se puede decir así– de Leucipo fue Demócrito de Abdera, quien expuso un concepto unitario del universo, al argüir que “Convencionalmente existe un dulce y un amargo, un caliente y un frío, y convencionalmente existe el calor. En realidad sólo existen átomos y un vacío”.<sup>29</sup> Después de Leucipo, arriba Epicuro de Samos con sus obras: el *Canon* y su *Tratado sobre la naturaleza*, para quien

---

<sup>25</sup> Marías., *Historia de...* p. 19.

<sup>26</sup> Grenet., *op. cit.*, p. 33.

<sup>27</sup> Marmasse, C. (1975): *La paciente historia del átomo*; SEP/SETENTAS. México. p. 21.

<sup>28</sup> <http://www.biografiasyvidas.com/biografia/l/leucipo.htm>.

<sup>29</sup> Marmasse., *La paciente historia...* p. 22.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Su principal teoría física es de tipo atomístico: los átomos, que tienen varias formas, se mueven en el vacío, en el cual entrec chocan; el alma está formada de átomos, los dioses mismos son hechos de átomos.<sup>30</sup>

En lo que se refiere a sus pensamientos de índole filosófica, sólo el placer debía constituir la base de la vida –el placer era para él una vida virtuosa, casi ascética– y ponía el ideal del sabio en la imperturbabilidad o *ataraxia*. Creía firmemente en la existencia de la deidad

Sin embargo, aseguraba la existencia de cierta libertad humana por medio de una idea muy ingeniosa...: no hay un determinismo absoluto a causa de la espontaneidad intrínseca de los átomos, la que los impulsa a hacer pequeños revuelcos en su carrera.<sup>31</sup>

Es con los atomistas, principalmente Heráclito y Parménides, con quienes parece ser que despunta el determinismo científico, y también, implícitamente, la consecuente discretización de la materia; el primero de ellos con sus leyes inexorables –incluyendo, posiblemente, las leyes del destino–,<sup>32</sup> y el segundo con su inmovilidad engañosa.<sup>33</sup>

Asimismo, se estima que el determinismo del pensamiento griego se transmite al pensamiento estoico, al suponer que todo ha emanado del *logos*, y por ello es que todo es rigurosa y profundamente racional. Es así que el mundo natural, en tanto que creación divina, debe ser perfecto pues está hecho del mejor modo (de entre todos los modos) posible. Sin embargo, el hombre, al verse lleno de imperfecciones, no desentona con la naturaleza puesto que todo es perfecto en sí, por lo que tales imperfecciones no deben verse de manera aislada, sino como parte de un todo, pues en el diseño de esta totalidad radica la perfección. Además la providencia, sinónimo de finalismo universal, se revela como destino, y en consecuencia, como necesidad ineluctable. Este hado, al igual que con los griegos, se vuelve el origen y motor de las causas del orden natural, y es

---

<sup>30</sup> *Ibid.*, p. 31.

<sup>31</sup> *Ibid.*, p. 32.

<sup>32</sup> Pienso que tal razonamiento puede ser factible, pues pudo haber tenido contacto, y concordado, con los escritores griegos. En caso de que no hayan sido contemporáneos, pudo estar influenciado por sus obras. Las inexorables leyes del destino suelen ser como las que campean en las tragedias griegas y los poemas de Homero, en las que los protagonistas se ven obligados a seguir al pie de la letra lo que el hado les depara. Sin duda, de tales obras literarias descuellan la Tragedia de Edipo –donde el Oráculo de Delfos augura el destino del infortunado protagonista– y la Iliada, que exhibe el cruce de destinos de Aquiles y Héctor.

<sup>33</sup> Para él, el universo es una esfera sólida, eterna, limitada, homogénea e inmóvil, donde todo cambio es ilusión y engaño de los sentidos.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

necesario a todas las cosas; con ello, el azar como tal es inexistente, pues no es más que el simple desconocimiento causal de los acontecimientos.

Después de la escuela atomista y su materialismo en ciernes, con sus revolucionarias ideas que intentan vincular los átomos con el ser y con el no-ser (el vacío, que después de asignarle existencia se trueca en espacio), el pensamiento de índole científica comienza a decaer; Marmasse asegura que

Después de la escuela atomista se advierte una notable regresión del pensamiento científico. Se ha transformado Atenas en la más importante de las ciudades áticas, y toda la energía de los atenienses está dirigida hacia el mundo exterior; la política triunfa sobre el pensamiento. Ahora los filósofos sólo atribuyen importancia a las sensaciones. Para Sócrates, el alma es la única realidad que merece ser estudiada; Platón rechaza el determinismo mecánico y adopta un misticismo teñido de escepticismo. Aumenta la influencia de Pitágoras; se vuelven antropomórficas la física y la biología. Se concibe ahora el universo o cosmos como un ser vivo dotado de cuerpo, alma y discernimiento, y muy pronto en la filosofía de Platón sólo los arquetipos constituirán la realidad.

Con la llegada de Aristóteles el atomismo desanda lo andado... En su trabajo *De los cielos* abunda en la teoría de los cuatro elementos. Es perecedera la materia; existen dos tendencias mayores: la generación y la destrucción. Así, los principios opuestos dos a dos del calor y del frío producen, mediante su acción mutua, los cuatro elementos, es decir, el fuego, el aire, la tierra y el agua. Estos elementos son de origen terrestre, y añade Aristóteles un quinto elemento, esta vez de origen divino: *el éter*, que hace perfectos e incorruptible los cuerpos celestes.<sup>34</sup>

Ahora bien, los filósofos, aun cuando se apartan del pensamiento científicista que venía creciendo entre los atomistas, continúan indagando el por qué de las cosas. Un buen ejemplo de ello es Platón quien, por boca de Sócrates, destaca el carácter intelectual de la ciencia –como una herramienta que permite allegarse conocimiento– y el estrecho vínculo existente entre la inteligencia del hacedor de ciencia y el mundo sensorial, necesario para la aprehensión de la realidad; más aún, propone que la realidad puede ser –o quizá es– la misma para todos, siendo además, susceptible de ser racionalizada,<sup>35</sup> al postular que

La ciencia no reside en las impresiones sino en el razonamiento sobre las sensaciones, puesto que, según me parece, sólo por el razonamiento se puede descubrir la ciencia y la verdad, y es imposible conseguirlo por otro rumbo.<sup>36</sup>

---

<sup>34</sup> Marmasse., *op. cit.*, pp. 27-30.

<sup>35</sup> Pienso que quizá este problema merezca un comentario adicional, dado que para que un individuo cualesquiera llegue a la comprensión del quehacer científico debe conocer el lenguaje en el que éste se expresa. Tal lenguaje debe entonces tener características especiales, siendo sus atributos: la unicidad, la exactitud, la coherencia, la sencillez y la elegancia, lo que nos remite, indudablemente, a las matemáticas.

<sup>36</sup> Platón; *Diálogos de Platón. Teetetes o de la ciencia*; 15ª. Edición; Editorial Porrúa, S. A.; México, 1975. p. 330

De igual manera, Platón no admite el mecanicismo de los atomistas pues al disertar sobre el tema del ser y las ideas reflexiona que “un ser que crece no es un ser que adiciona partículas.”<sup>37</sup> Este erudito también se preocupa por la causalidad en el medio natural dado que “todo lo que nace proviene necesariamente de una causa, porque sin causa nada puede tener origen”,<sup>38</sup> aunque parece ser que el orden natural lo atribuye al bien como su instaurador, pues

En la República (VI) nos presenta al bien como causa del ser y de la inteligibilidad de las formas. Pero en el Filebo, estudiando las condiciones generales de la existencia, descubre que todo lo que se considera existente está compuesto de límite e ilimitado, pero que la unión conyugal de estos dos factores exige una causa: «Mira, dice Sócrates a Protarcas, si no crees necesario que todo lo que nace nazca por la acción de una causa» (26c). Se trata del «principio de causalidad» que en el Timeo se expresa todavía con mayor claridad: «Todo lo que nace, nace necesariamente por la acción de una causa, pues es imposible que algo pueda nacer sin causa» (28a). El bien que hallamos en la *República*, pura causa formal, adopta de esta manera los rasgos del obrero (= Demiurgo) bueno, que comunica su bondad a su alrededor.<sup>39</sup>

Mención aparte merece el caso del ser y las ideas, pues al abocarse a indagar qué es lo que define al ser como tal (como un ser), Platón asegura que la realidad no es como la percibimos y que lo que describimos solamente es una ‘cuasi-realidad’, o sea, le quita la posibilidad de ser algo concreto, por lo que lo único que puede revelarnos la naturaleza real de las cosas son las ideas que de ellas tenemos, ya que

El ser verdadero, que la filosofía venía buscando desde Parménides, no está en las cosas, sino fuera de ellas: en las ideas. Estas son, pues, unos entes metafísicos que encierran el verdadero ser de las cosas [...] Las ideas tienen los predicados exigidos tradicionalmente al ente y que las cosas sensibles no pueden poseer: son unas, inmutables, eternas [...] Platón inicia la escisión de la realidad en dos mundos: el de las cosas sensibles, que queda descalificado, y el de las ideas, que es el verdadero y pleno ser.<sup>40</sup>

Sin embargo, el argumento de que la realidad verdadera está representada solamente por las ideas introduce un conflicto con la manera en que abordamos el estudio de la naturaleza, pues la realidad la aprehendemos debido a que son, en primera instancia, nuestros órganos sensoriales quienes nos ponen en contacto con ella, y por tanto, las imágenes que de la realidad tenemos pueden no ser todo lo fidedignas que deseáramos

---

<sup>37</sup> Grenet., *Ontología...* p. 33.

<sup>38</sup> Platón; *Diálogos de Platón. Timeo o de la naturaleza*; 15ª. Edición; Editorial Porrúa, S. A.; México, 1975. p. 671.

<sup>39</sup> Grenet., *Ontología...* p. 236.

<sup>40</sup> Marías., *op. cit.*, p. 45.

(inclusive podrían estar completamente distorsionadas) lo que no nos permitiría teorizar adecuadamente para conocer, en sí misma, cómo es la realidad. Y es que sólo tenemos ideas o imágenes de aquello que percibimos; por ejemplo, no tenemos una idea clara de cómo es, ya no digamos Dios, sino un átomo, porque no tenemos manera de percibirlo, a menos que sea teóricamente. Lo que Platón ha propuesto acerca de las ideas implica que éstas, en tanto que representantes de la realidad misma, al provenir de una entidad absoluta y etérea, adquirirían el carácter de imágenes o representaciones innatas y comunes a todo ser humano, cosa que al parecer no ocurre, pues más bien las ideas se encuentran estrechamente interrelacionadas con las experiencias que se derivan de nuestra interacción con el mundo material; son nuestros sentidos y nuestra mente los que articulan los distintos y variados elementos que vamos observando del mundo y conforman una representación inmaterial en nosotros, que sería la idea. En lo que es admisible suponer que Platón tiene razón –al igual que Galileo, Newton, Einstein y Heisenberg, posteriormente– es que los objetos matemáticos, en tanto que ideas, cobran “vida propia” y nos permiten abordar la realidad, aun cuando ésta no sea la realidad verdadera, sino la “realidad percibida” o en su defecto, la “realidad modelada”; de hecho, es tan grande la fortaleza de la matemática que muchas veces nos dice y/o permite concluir –en el sentido de una demostración, más que de un descubrimiento– más cosas que las imágenes pictográficas que generamos, aun cuando tengan la limitante práctica de restringirse al fenómeno modelado, es decir, la matemática. Podemos manejar, por ejemplo, un espacio  $n$ -dimensional, pero en la realidad tangible sólo tenemos tres dimensiones. Sin embargo, la matemática nos ayuda a representar de manera efectiva lo que ocurre en la naturaleza.

Así, parece que velada o involuntariamente, Platón nos lleva a pensar que somos, por una parte, un sustrato de ‘espíritu’ (o alma o entelequia, por llamarle de algún modo) puramente lógico –y absolutamente racional– que toca los linderos de una perfección sobrenatural y que está continuamente en contacto con la realidad; y por otro lado, ‘materia imaginativa o que ensueña’ que nos pone en contacto, de algún modo, con lo que nos rodea, que es la cuasi-realidad. Lo importante está en que la materia tiende a quedar constantemente bajo el yugo del espíritu, y es por eso que podemos pensar racionalmente, es decir, las ideas platónicas serían la metafísica y la metamatemática del ser humano, justificando así el por qué tenemos imaginación. En el fondo, Platón propone una especie de concordancia o relación directa entre idea y objeto real, aunque aquella es

de carácter verdadero; la manera en que procede es análoga a la que se instituyó después en la física, pues establece una especie de isomorfismo entre los objetos de la naturaleza y su representación simbólica dada por la matemática. De manera incidental, y por ser de relativa importancia dentro de las implicaciones filosóficas asociadas al Principio de Incertidumbre, podemos decir que al intentar justificar el mencionado principio, Heisenberg asume la postura platónica al ubicar la realidad cuántica en el matematizado mundo de las ideas.

Por su parte, el último gran filósofo de la época de oro del pensamiento griego, Aristóteles, haciendo gala de una observación cualitativa excelente, y haciendo uso del método inductivo, pretendió encontrar una explicación clara a los sucesos del mundo cotidiano; evidentemente, comienza por clasificar los objetos del universo –a los que asigna un lugar natural– y los agrupa dependiendo de su naturaleza: los objetos terrenales –mutables, corruptibles y destructibles– de naturaleza material, y los de naturaleza etérea –inmutables, incorruptibles y eternos– que habitan los cielos; esto le lleva a aventurar la hipótesis de los cinco elementos, los cuatro propuestos por Empédocles más el éter. Aristóteles, lo mismo que Platón, impugnaba las ideas de los atomistas y negaba la existencia del vacío, defendía la tesis de la estructura continua de la materia y además sostenía que la creación de las cosas era obra de la deidad, rechazando con ello que el azar tuviera que ver con la creación ya que “tampoco era razonable atribuir al azar o a la fortuna una obra tan grandiosa”.<sup>41</sup>

Aristóteles es el primer pensador que impulsa el estudio de la naturaleza (la física) como ciencia, proponiéndola como independiente de la filosofía o metafísica, al indagar qué causas gobiernan el comportamiento de los cuerpos en el mundo. Marías, al estudiar la obra de Aristóteles, expone que

La ciencia física tiene por objeto los entes móviles. Comparada con la filosofía primera o metafísica, es *filosofía segunda*. Por su tema, coincide con el contenido de la especulación filosófica griega de la época presocrática. Por esta razón, Aristóteles tiene que ocuparse en el libro I de la *Física* de las opiniones de los antiguos, especialmente de los eleáticos, que niegan la naturaleza y, por tanto, la posibilidad misma de la física. Para los eleáticos no existe el movimiento; es decir, el movimiento *no es*, no tiene ser, y por consiguiente no puede haber una ciencia de la naturaleza. Aristóteles tiene que reivindicar frente a esta tesis, la realidad del movimiento y establece como principio y supuesto que los entes naturales, todos o algunos al menos, se mueven; lo cual, añade, es evidente por la experiencia o inducción.<sup>42</sup>

---

<sup>41</sup> Grenet., *op. cit.*, p. 235.

<sup>42</sup> Marías., *op. cit.*, p. 74.

Y es que el creador de la lógica formal no podía proceder de otra manera sino siguiendo una línea de razonamiento impecable para explicar el movimiento,<sup>43</sup> por ello, además de recurrir a la observación cuidadosa, se da a la tarea de discriminar con claridad el movimiento o reposo de un objeto, y lo más importante: por qué se dan tales hechos. Intuye que debe haber “algo” que actúe sobre el objeto (o que interactúe con él), ocasionando que éste modifique el estado natural de movimiento que guarda. Esta manera más “naturalista” o causalista de ver los eventos conduce a una manera más racional y humana de explicar el acontecer natural, alejando de la explicación la intromisión divina; es decir, no es necesario que los dioses participen activa y continuamente en el movimiento de los objetos del mundo, pues existen causas que motivan la dinamicidad de las cosas. Aristóteles introduce cuatro causas o principios fundamentales<sup>44</sup> que actúan sobre los objetos naturales, a saber:

- ❖ Causa Material: Nos remite a la materia que constituye los objetos, es decir, de qué material están hechos.
- ❖ Causa Formal: Se refiere a la forma y esencia de cada objeto. “Es aquello que hace que un ser sea precisamente lo que es. [...] «El determinante intrínseco del ser»,”<sup>45</sup> o como dice Marías: “La causa formal o forma es lo que informa un ente y hace que sea lo que es”.<sup>46</sup>
- ❖ Causa Eficiente: “Es el principio primero del movimiento o del cambio, es quien hace la cosa causada,”<sup>47</sup> es decir, es la indagación de qué produce una cosa, y
- ❖ Causa Final: Lo que logra que se alcance la meta, es decir: “es el fin, el para qué”<sup>48</sup> o “el fin del devenir y de todo movimiento.”<sup>49</sup>

---

<sup>43</sup> Igualmente, según Marías: “El movimiento, como *actualidad de lo posible en tanto que posible*, consiste en un modo de ser que determina el paso de ser en potencia a ser en acto, en virtud del descubrimiento aristotélico de que el ente no es unívoco, sino analógico, y se dice de muchas maneras (πολλαχῶς). (*Ibid.*, p. 75).

<sup>44</sup> Para Marías: “Los principios son, a la vez, principios del ser y del conocer” y “Las causas son los posibles sentidos en que se puede preguntar por qué.” (Marías., *op. cit.*, p. 69).

<sup>45</sup> Grenet., *Ontología...* pp. 231-232.

<sup>46</sup> Marías., *op. cit.*, p. 69.

<sup>47</sup> *Ibid.*, p. 69.

<sup>48</sup> *Ibid.*, p. 69.

<sup>49</sup> Grenet., *op. cit.* p. 247.

Como se ve, estas causas buscan determinar con mayor verosimilitud el comportamiento de los objetos naturales, pudiendo llegar a asimilarse, en el ámbito de la física, la causa material al concepto actual de densidad de una sustancia, la causa eficiente con la fuerza y la causa final se relacionaría con los conceptos dinámicos, que son los que dictan cómo ha sido la evolución del sistema. Evidentemente, las propuestas causales aristotélicas buscan mayor profundidad explicativa respecto de por qué los objetos son lo que son y por qué se comportan como lo hacen y no de otra forma, siendo esto prácticamente imposible de dilucidar por la física, pues ella no se preocupa de cómo es el objeto –en el sentido de que pudo ser otro y no el que es– y, si bien es cierto que se aboca a predecir comportamientos, lo hace mediante heurísticas enfocadas a resolver problemas que se derivan de la recopilación de datos empíricos. Aún así, la concepción aristotélica acerca del determinismo subsiste en la ciencia a través de las eras, pues tal y como Aristóteles profiere: “«la ciencia es el conocimiento cierto por las causas»”.<sup>50</sup> Aún hoy muchas personas sostienen eso.

### 1.1.3 La edad media

La edad media es una de las épocas de menor producción científica de que se tenga memoria. En ese tiempo, el poder político se hallaba disperso en múltiples regiones (entre reinos y feudos), lo que derivó en un escaso interés por el desarrollo de la ciencia y las artes, promovidas tan sólo por el mecenazgo, los monasterios y, cuando aparecieron, las universidades; “el conocimiento científico en la Edad Media se restringía a los círculos académicos de las cortes y de las grandes universidades,” asevera Martínez.<sup>51</sup>

Pero con el correr del tiempo la iglesia alcanzó una organización centralizada más eficiente, representada por el Papa, lo que le permitió gobernar sobre los distintos reinos que conformaban Europa e, indirectamente, impulsar el arte. Y es que después de la caída del imperio romano, con las guerras intestinas entre los distintos feudos y reinos de Europa, la difusión del saber fue competencia casi exclusiva de la cultura árabe, pues

---

<sup>50</sup> *Ibid.*, p. 229. En el mismo talante, Marías aduce que: “Para Aristóteles, la ciencia, que es de lo universal, porque lo individual tiene una infinidad de notas y no puede agotarse en un saber, y que no es del accidente, sino de la esencia, es ante todo ciencia demostrativa, que hace conocer las cosas por sus causas y principios. Saber no es ya discernir, como en los presocráticos; ni siquiera definir, como en Sócrates y Platón, sino demostrar, saber el por qué.” (Marías., *op. cit.*, p. 69).

<sup>51</sup> Martínez, Sergio F. (1997): *De los efectos a las causas. Sobre la historia de los patrones de explicación científica*; UNAM-Paidós. México. 2001. p. 53.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

fueron ellos quienes se encargaron de estudiar, y después propalar, las obras de la cultura griega. En la Europa cristiana de ese entonces, el desarrollo de las ciencias fue, prácticamente, inexistente, comenzando a vislumbrarse avances muy lentos sólo al irse recuperando algunos territorios conquistados por los musulmanes.

En lo referente al determinismo, en la baja edad media, descuella Ben Safwan, “defensor del fatalismo islámico”,<sup>52</sup> por ser un firme apologista del determinismo divino que niega la libertad humana, y para quien “todo cuanto acontece está ineludiblemente determinado por la libérrima voluntad de Dios. Esta determinación alcanza a los mismos actos del hombre, de modo que no queda lugar para la libertad.”<sup>53</sup> Y es que para la Europa medieval, inmersa en los dogmas de la fe cristiana, pasando previamente por San Agustín y Santo Tomás de Aquino, el determinismo era inobjetable pues, en términos generales:

para todos los filósofos y teólogos cristianos las leyes de la naturaleza son hipotéticamente necesarias. Por ello, todos los fenómenos naturales suceden, por lo general, de un modo regular. Pero este comportamiento no es esencia sustancial de las cosas; es algo accidental; por lo mismo, puede ser suspendido o modificado por el omnipotente poder divino. Dios no puede hacer, por ejemplo, que el hombre no sea animal racional, porque la animalidad y racionalidad pertenecen a su esencia. Pero sí puede hacer que, en un caso concreto, el hombre no actúe como animal. [...] Fuera de Dios, ninguna criatura, por su propio poder, es capaz de suspender las leyes naturales.<sup>54</sup>

Quizá la disputa más relevante de estos tiempos, y de naturaleza teológica,<sup>55</sup> respecto al determinismo haya sido la controversia entre jesuitas y dominicos, que relacionaron el determinismo con la voluntad del hombre; los bandos estaban conformados por los molinistas y por los bañesianos, respectivamente. Aún cuando ambas sectas admitían el determinismo, la discusión se centró en el libre albedrío y el rol que Dios jugaba dentro de la toma de decisiones de los hombres, pues si el determinismo existe, entonces el ser humano está predestinado a seguir un curso de acción ya decidido con antelación por Dios, con lo que la libertad no pasa de ser un sueño ilusorio, y en consecuencia, el hombre no tiene responsabilidad moral de ninguna índole por sus acciones. Sin embargo, para los molinistas, no obstante el determinismo, sí hay libertad de decisión, pues si bien Dios es capaz de prever lo que va a ocurrir e influye en las decisiones del ser humano, es éste quien decide; Dios sólo le induce a ir hacia el lado donde (Dios) desea que vaya, es

---

<sup>52</sup> [http://www.mercaba.org/DicPC/D/determinismo\\_e\\_indeterminismo.htm](http://www.mercaba.org/DicPC/D/determinismo_e_indeterminismo.htm)

<sup>53</sup> *Ibidem.*

<sup>54</sup> *Ibidem.*

<sup>55</sup> En este caso, toco incidentalmente la disputa teológica entre jesuitas y dominicos porque: “Aunque todas estas doctrinas son primariamente teológicas, los conceptos elaborados en ellas son con frecuencia filosóficos y pueden ser utilizados en el tratamiento de los problemas de la causa.” (Ferrater Mora., *op. cit.*, p. 50)

decir, de alguna manera la coparticipación divina ocasionaría un sesgo en la voluntad humana, y si el camino es el correcto –moralmente hablando– es porque tal sujeto se halla cobijado bajo la gracia divina, pues

La infinita inteligencia de Dios ve claramente qué sucedería en cualquiera circunstancias concebibles. Sabe por tanto, qué escogerá el libre albedrío de cualquier creatura, si se le da el poder de volición y se le sitúa en ciertas circunstancias dadas. Decreta entonces que se provean las condiciones requeridas, incluyendo Su *corcursus*, o se abstiene de hacerlo. Tiene por tanto, dominio completo y control sobre nuestras futuras libres acciones, así como sobre aquellas de carácter necesario. El molinista alega entonces resguardar mejor la libertad del hombre al sustituir el decreto de una premonición inflexible, por uno de concurrencia dependiente en el previo conocimiento de Dios de lo que un ser libre escogería; si se le diera el poder de hacer la elección.<sup>56</sup>

Por el contrario, los bañesianos –y en general, los dominicos– argumentaban que

La llamada solución dominica o tomista, en pocas palabras, enseña que Dios premotiva a cada hombre en todos sus actos a la línea de conducta que subsecuentemente adopta. Sostiene que este decreto premotivo inclina la voluntad del hombre con absoluta certeza hacia el lado decretado, pero que Dios adapta esta premotivación a la naturaleza del ser así premotivado. Arguye que dado que Dios posee infinito poder, puede premotivar infaliblemente al hombre –quien por naturaleza es una causa libre– a escoger libremente un curso de acción [...] Además este decreto premotivante, siendo inevitable aunque adaptado a la medida de la naturaleza del hombre, provee un medio en el que Dios ve anticipadamente con certeza las futuras opciones libres del ser humano. El decreto premotivador es por tanto anterior en orden de pensamiento a la cognición Divina de las futuras acciones del hombre.<sup>57</sup>

Es así que con el transcurso del tiempo y con el avance de la religión cristiana en Europa, el determinismo religioso poco a poco se va imponiendo en el pensamiento medieval, y la teología, a la par que la astronomía, adquieren el carácter de obligatorias en los centros de estudio; mientras tanto, la ciencia va quedando rezagada y sumida en la clandestinidad o bien, sujeta a los dictados de autoridad de los eclesiásticos; Marmasse lo expresa como

Al inicio de la cristiandad las concepciones simbólicas tienen una importancia considerable, en particular bajo la influencia de Orígenes, quien se esforzaba por reconciliar las doctrinas de la Biblia y las enseñanzas de la filosofía griega. Posteriormente la iglesia católica reaccionará contra este concepto, que será oficialmente condenado en el concilio de Nicea (325). Y la ciencia será considerada como nefasta: “Discutir sobre la naturaleza y la ubicación de la tierra no nos ayuda en nuestra esperanza de la vida por venir”, decía Ambrosio, y poco a poco desaparecía la ciencia. Sin embargo, se hicieron notar reacciones contra la prohibición durante la *edad negra*. Por intermedio de Constantinopla, Rusia tomó conocimiento de los manuscritos griegos; Carlomagno estimulaba la creación de escuelas.

---

<sup>56</sup> Enciclopedia Católica. *Libre voluntad*. p. 3. <http://ec.aciprensa.com/librevoluntad.htm>

<sup>57</sup> *Ibid.*, p. 3.

Resulta muy claro que la disciplina científica más estudiada es la astronomía. Pueden ser evocadas, para explicarlo, muchas razones (tal vez sea inquietante el gran número de ellas). En primer lugar, durante una temporada muy larga, el estudio de los cuerpos celestes ha revestido un carácter religioso innegable, pues algunas determinaciones astronómicas eran necesarias a la iglesia católica porque la fecha de la feria de las pascuas se determinaba en relación con el calendario lunar. También la física de Aristóteles, que gozaba –como hemos visto anteriormente– de tanta fama, atribuye una importancia muy grande a la mecánica de los cuerpos celestes. No se olvidará tampoco el gran número de fenómenos celestiales que se encuentran reportados en la Biblia. De una manera general son admitidos los estudios de física y de astronomía con un fin apologetico: para refutar los ataques de los paganos contra la Biblia.<sup>58</sup>

#### 1.1.4 La edad de la razón

Después de la Edad Media –época de contiendas teológicas, de profundas crisis económicas y de encarnizadas guerras a lo largo y ancho de Europa– se llega al Renacimiento, era en la que comienza a haber un relajamiento del autoritarismo religioso, un redescubrimiento de los textos grecolatinos antiguos, un florecimiento de ciudades-estado y el nacimiento del concepto de cultura. Es la época de los grandes pintores y los grandes escultores, destacándose Leonardo da Vinci (precursor de la ciencia actual) y Galileo Galilei, ambos científicos brillantes, y ambos genios. Y es que en la edad media y su propensión por una ciencia más cualitativa que cuantitativa, la física se sumió en una especie de letargo, pues los desarrollos fueron lentos y esporádicos; es en esta etapa donde la relación matemática entre las cosas para explicar los fenómenos vino a menos, si bien siguieron usándose la geometría y el álgebra y perduró el uso de algunos principios como el de la palanca o el de Arquímedes, además de darse un despunte de la ingeniería.<sup>59</sup> Es en este tiempo que comienza a aparecer un realismo incipiente en la física como una reacción a la idea tradicional de justificar, con un método sustentado en especulaciones y en observaciones cualitativas –o semi-cuantitativas, en el mejor de los casos, como en el modelo geocéntrico ptolemaico–, la realidad de las cosas. La física comienza por evaluar el comportamiento natural de los objetos en tanto que entidades individuales que se ubican en un referencial bien determinado y asumen comportamientos bien definidos, y comienza también, aunque de manera incipiente, a cuestionar las opiniones científicas de Aristóteles que aún continúan siendo un dogma. Esto es el motivo por el que “los físicos quedan fuera de la filosofía [...] En realidad, los físicos

---

<sup>58</sup> Marmasse., *La paciente...* pp. 46-47.

<sup>59</sup> Martínez., *De los efectos...* p. 53.

piensan la idea moderna de la naturaleza”,<sup>60</sup> pues “partiendo de la metafísica nominalista, en los siglos XVI y XVII se constituye una ciencia natural que difiere esencialmente de la aristotélica en los dos puntos decisivos: la idea de la naturaleza y el método físico.”<sup>61</sup>

Es entonces que la idea de una naturaleza independiente del ser humano parece delinearse en la física pues ésta se encargará de estudiar sólo las variaciones naturales en términos de procesos, más que en el conocimiento real de las cosas –tal como pretendió hacer Aristóteles– al orientarse más a describir que a explicar; con ello, la física se irá desprovveyendo cada vez más de explicaciones u objeciones metafísicas, permitiéndose esclarecer –no en principio, sino legalmente– el acontecer natural en forma de modelos matemáticos que gobernarán su evolución.

Galileo, considerado el padre de la física moderna,<sup>62</sup> encarna el prototipo de físico: buen experimentador y teórico acucioso y sagaz; utiliza magistralmente los métodos hipotético-deductivo e inductivo y se apoya en la experimentación y el modelaje matemático como una manera de demostrar sus argumentos y refutar los (argumentos) aristotélicos. Para él, la descripción de la naturaleza debe encontrarse tanto en la medición como en las matemáticas, lo que le llevará a establecer una mayor consonancia entre el evento y su representación simbólica.<sup>63</sup>

---

<sup>60</sup> Marías., *op. cit.*, p. 188.

<sup>61</sup> *Ibid.*, p. 193.

<sup>62</sup> Es tal la trascendencia de Galileo en la ciencia que en Wikipedia aparece: “En relación a las aportaciones científicas de Galileo, además de a las realizadas por Copérnico y Kepler es frecuente referirse a ellas como una revolución científica en la astronomía que inició la ciencia moderna (caracterizada por la matematización, el mecanicismo y la experimentación) y supuso un cambio de paradigma tanto en la astronomía (pasó del geocentrismo al heliocentrismo) como en modo de trabajo en otras disciplinas que se fundamentó en el método científico [...] Para Stephen Hawking, Galileo probablemente sea, más que cualquier otro, el máximo responsable del nacimiento de la ciencia moderna; Albert Einstein lo llamó “Padre de la ciencia moderna.” ([http://es.wikipedia.org/wiki/Galileo\\_Galilei](http://es.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei))

<sup>63</sup> Parece ser que el primero que establece formalmente un isomorfismo, o analogía, entre un evento natural y su representación en papel para encontrarle solución fue Eudoxo o Eudoxio al hacer suyo el problema que Platón plantea en “La República” y “El Timeo”, en tal problema, Platón examina el sistema del mundo, estudia el movimiento retrógrado de los planetas y considera a la Tierra como una esfera no soportada que se sitúa en el centro del Universo, y desde donde se debe descomponer el movimiento de los planetas en una superposición de movimientos circulares uniformes. Para solucionar el problema, Eudoxio supuso que la Tierra era el centro del universo y que alrededor de ella se situaban otras esferas de distintos tamaños, una dentro de otra, transparentes y concéntricas todas entre sí y con respecto a la tierra. Si bien, este modelo fue insatisfactorio inicialmente, fue corregido por el discípulo de Eudoxio, Calipo. Este modelo –homocéntrico– aseguraba que los cielos giraban de Este a Oeste. (Lagemann, R. T. (1963): *Ciencia Física. Orígenes y Principios*; Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana. México, 1968. pp. 47-49).

Existe también la versión de que fue Copérnico quien instituyó el modelaje tal y como lo entendemos actualmente. En la página: <http://www.monografias.com/trabajos16/nicolas-copernico/nicolas-copernico.shtml#COSMOL>, aparece que: “La Iglesia no tenía ningún inconveniente en aceptar otros modelos distintos del geocéntrico para salvar las apariencias. De hecho, como un conjunto de meras hipótesis, la teoría heliocéntrica fue utilizada para la reforma del calendario realizada por Gregorio XIII (1582). El problema no

Galileo utiliza su enorme capacidad deductiva para concluir resultados que modifican y simplifican las tesis aristotélicas del movimiento. Mientras que él utiliza sus razonamientos para describir el movimiento, Aristóteles lo hace para explicarlo; es decir, el filósofo propone causas como origen de los eventos, pues para él es crucial dar detalle de los orígenes del movimiento; el físico, en cambio, ignora las causas deliberadamente –quizá por considerarlas campo de estudio de la filosofía–, contentándose con “dar razón” de los acontecimientos, apoyándose sólo en descripciones geométricas, pues para él sólo importa el desenvolvimiento del evento. Asimismo, los asertos aristotélicos son supuestos lógicos e inobservables que buscan, en principio, instituir leyes que gobiernen la naturaleza; en cambio, los asertos galileanos se derivan de la observación y son susceptibles de confrontación empírica –aunque irónicamente, muchos de sus experimentos fueran ideales, dada la limitación instrumental propia de su época– y asumen la existencia de leyes naturales, a las que invoca; es así que

A diferencia de la física escolástica, racional, la de Galileo sería experimental, empírica, y nacería de la observación de la naturaleza [...] El punto de partida del físico es una *hipótesis*, es decir, una construcción *a priori*, de tipo matemático. Antes de experimentar, Galileo sabe lo que va a pasar; el experimento, simplemente, comprueba *a posteriori* ese saber apriorístico. El físico interroga a la naturaleza con un previo esquema o cuestionario, que es la hipótesis matemática, la construcción mental.; *mente concipio*, concibo con la mente, decía Galileo. Y con los instrumentos, con el experimento, el físico pone en cuestión a la naturaleza y la obliga a responder, a confirmar o desmentir la hipótesis [...] La física es ciencia, y, por tanto, construcción apriorística; pero no es ciencia ideal, como la matemática, sino de realidad, y por eso requiere confirmación experimental.<sup>64</sup>

Con el arribo de Galileo, y posteriormente de Descartes y de Newton, se presenta una modificación sustancial en el “hacer física” que marca un hito, no sólo en la manera de proceder de los científicos, sino también en el pensamiento del hombre. Para ellos (principalmente para Galileo) la matematización de la realidad se constituyó en su *leit*

---

estaba pues en la propia teoría, sino en el carácter que se le pretendiera dar. Si se presentaba como un conjunto de cálculos coincidentes con las observaciones, entendidos más como un artificio matemático que como un reflejo de la realidad, la Iglesia no ponía ningún obstáculo, más bien lo contrario, ya que el modelo copernicano presentaba mayores ventajas que el ptolemaico, entre ellas la sencillez de los cálculos [...] La cuestión de la verdad es dejada por el editor para los filósofos, los cuales a su juicio tampoco podrán descubrirla pues está reservada a la divinidad. Se renuncia expresamente a conocer el verdadero movimiento de los planetas y del Sol. El hombre debe conformarse con poder predecir lo que sucede, sin pretender con ello describir fielmente la realidad. Ni qué decir tiene que ésta no era la pretensión de Copérnico. Para él, el movimiento de la Tierra alrededor del Sol era un hecho físico, real, y no un artificio matemático. Mucho más lejos llegó Galileo que ni siquiera quiso admitir el carácter hipotético de la teoría: simple y llanamente se trataba de la verdad.”

<sup>64</sup> Marías., *Historia de...* p. 196.

*motiv* al considerar que nos remite a una naturaleza inteligible y armónica en la que impera una normatividad suprahumana. Es por eso que la matemática se vuelve esencial en la explicación de la realidad, además de ser un lenguaje único que nos permite postular y racionalizar –y disfrutar– la belleza de una verdad inmutable del mundo que está más allá de nuestras experiencias sensibles y a la que solamente podemos acceder mediante la razón. De esto es representativa la sentencia de Galileo: “la matemática es el alfabeto con el cual Dios ha escrito el Universo”.<sup>65</sup>

Para Descartes, el movimiento existente en el Universo en un momento concreto es derivación de un movimiento inicial que Dios imprimió en el mundo después de haberlo creado.<sup>66</sup> Para él –contrario a lo que Galileo intuye– la fuerza no es un concepto tangible, por lo que se ve obligado a introducir una geometría más sofisticada en la física –la geometría analítica– y la idea de la cantidad de movimiento,<sup>67</sup> cantidad que se mantiene constante en sus diversas manifestaciones.

Descartes, convencido de que la naturaleza es armónica *per se* y está regida por principios naturales sencillos, es proclive a racionalizar, como Galileo, el acontecer natural asociando relaciones matemáticas a los fenómenos naturales, aun a costa de introducir hipótesis simplificadoras, convencido de que ello explica, de forma por demás estética, el suceso. En esto se comporta como lo hicieran antes Copérnico y Kepler y su intención por racionalizar el movimiento de los planetas: aquél con su modelo heliocéntrico de órbitas planetarias circulares –por ser figuras geométricas perfectas, de acuerdo a la percepción de los griegos– y éste con una visión inicial que entremezclaba las concepciones pitagórica y platónica, al considerar que los sólidos regulares euclidianos se relacionaban con los planetas (fue la observación lo que condujo a Kepler a proponer sus leyes en las que se hace patente que las órbitas planetarias son elípticas y no circulares). Sobra decir que tanto Copérnico como Kepler desconocían el concepto fuerza.

---

<sup>65</sup> Pudiera ser que la frase que cito de memoria no sea más que un arreglo poético de lo que Galileo profirió. En Lagemann, aparece que lo que el sabio dice es que: “La Filosofía (con el sentido de estudio de la Naturaleza)... está escrita en ese enorme libro siempre abierto ante nuestros ojos, es decir, el Universo; pero no podemos leerlo hasta no haber aprendido su idioma y familiarizarnos con los caracteres en los que está escrito. El idioma son las matemáticas y las letras, triángulos, círculos y otras figuras geométricas” (Lagemann., *Ciencia Física*...p. 109).

<sup>66</sup> En alguna parte leí una frase humorística relativa Descartes y Newton, ambos matemáticos, ambos físicos y ambos filósofos. La frase reza más o menos así (cito de memoria): “La teoría de Descartes se infiere a partir de Dios, mientras que Dios se infiere a partir de la teoría de Newton”.

<sup>67</sup> Esta es una cantidad vectorial, y se la define como el producto de la masa y la velocidad del cuerpo, es decir:  $\vec{p} = m\vec{v}$ .

Con su desarrollo de la geometría analítica y la cantidad de movimiento, Descartes retoma no sólo la racionalidad matematizada presente en sus predecesores, sino también una relación causal que comienza a asentarse lenta, pero firmemente, en el lenguaje matemático; esto incita a Descartes a considerar el comportamiento de la naturaleza como análogo al funcionamiento de una máquina, implantando con ello un determinismo mecanicista –al igual que Newton, aunque sustentado en la cantidad de movimiento lineal o impulso– en el que todos los fenómenos naturales pueden ‘explicarse’ por la extensión o la masa y el movimiento mecánico.

Pero es a partir de 1687 –fecha en que aparecen los *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, de Isaac Newton– cuando todo cambia irreversiblemente. En esta obra, Newton exhibe su tremenda capacidad intelectual al establecer la mecánica sobre una fundamentación axiomática, introduciendo además la ley de la gravitación universal. Su tratamiento axiomático postulaba un marco de referencia común para todos los fenómenos naturales, además de considerar al tiempo y el espacio como absolutos. La obra en sí representa la culminación de la línea de pensamiento científico de Galileo y Kepler, siendo una magnífica síntesis unificadora de los resultados de los trabajos de Copérnico, Galileo y Kepler, además de conciliar, hasta en los más mínimos detalles, la teoría con las evidencias experimentales durante tanto tiempo acumuladas. Es superfluo señalar que la mecánica newtoniana mostró inmediatamente una asombrosa capacidad predictiva; de hecho, de la mecánica newtoniana se ha dicho que

La física ha tenido dos periodos de cambio rápido [...] La primera revolución ocupa casi todo el siglo XVII y fue tan completa que casi nada de lo que la precedió puede considerarse física, en términos modernos [...] Conviene considerar que la primera revolución empieza con Galileo y culmina con Newton (haciendo algo de injusticia a muchos valiosos predecesores y contemporáneos de estos dos grandes hombre. En ella se creó la mecánica clásica, que es probablemente la teoría científica de todos los tiempos que más éxito haya tenido. Durante dos siglos esta teoría barrió con todas las demás, y un fenómeno tras otro cedían a la explicación en términos de la mecánica.<sup>68</sup>

Asimismo, esta nueva teoría tuvo vastas repercusiones. Las (tres) leyes del movimiento y la ley de la Gravitación Universal, además de constituirse en los ejes fundamentales de la teoría clásica, vinieron a modificar la concepción que se tenía de la ciencia y le dieron nuevo rostro al universo, pues

---

<sup>68</sup> March, R. (1977): *Física para poetas*; Siglo XXI Editores. México. pp. 12-13.

Dejando a un lado la legión de teólogos (piadosamente) olvidados del siglo XIX, que llegaron a considerar al Creador como una suerte de maestro relojero, se manifestaron cierto número de tendencias intelectuales en relación con el éxito de la mecánica. Para muchos filósofos, y aun para algunos de los pensadores políticos más importantes del siglo XIX, la física se convirtió en el modelo de toda teoría intelectualmente respetable.<sup>69</sup>

El éxito de la propuesta de Newton fue, prácticamente, tan inmediato y tan arrollador que difícilmente se ha presentado en la historia de la ciencia otro caso más espectacular que éste.<sup>70</sup> Es por esto que More asegura que “No hay otros ejemplos de hazaña en la historia de la ciencia para compararlos con los de Newton durante estos años dorados.”<sup>71</sup>

Con afán simplificador, puede decirse que la mecánica clásica redujo todo el misterio, el desorden y la complejidad del universo conocido a una explicación proporcionada por resultados matemáticos que están sustentados en algunos pocos postulados y principios físicos que nacen de evidencias experimentales.<sup>72</sup>

- Los objetos que estudia la física se consideran partículas de masa, donde una partícula es un objeto sin extensión, de tal forma que no intervienen las consideraciones relativas a las rotaciones o a las vibraciones.
- El estado inicial de un sistema mecánico es único, y determina su movimiento, que se lleva a cabo según leyes exactas de acuerdo con un marco fijo de referencia.
- Nuestro espacio es tridimensional y euclidiano, es infinito en todas direcciones y uniformemente rígido.
- El tiempo es absoluto y fluye lo mismo para todos los entes, en forma completamente independiente del espacio. Es unidireccional y los sucesos conservan un orden cronológico, pudiendo tenerse acontecimientos simultáneos.
- Existe una instantánea acción a distancia entre las masas, que se manifiesta por medio de fuerzas.

---

<sup>69</sup> *Ibid.*, p. 14.

<sup>70</sup> Quizá sólo el caso de Einstein sea comparable, al publicar en la revista *Annalen der Physics* cinco artículos trascendentales en la física, entre los que destacaban el de la Relatividad Especial, el del Efecto Fotoeléctrico, y el del Movimiento Browniano, en 1905.

<sup>71</sup> More, L. T. (1934): *Isaac Newton, A Biography*; Dover. USA. p. 41.

<sup>72</sup> Tomados de los textos de la mecánica clásica: Symon, K. R. (1977): *Mecánica*; Colección Ciencia y Técnica. Ed. Aguilar; España. pp. 3-105. y: Arnold, V. I. (1978): *Graduate Texts in Mathematics: Mathematical Methods of Classical Mechanics*; Springer-Verlag. New York, Heidelberg, Berlin. pp: 3-14.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- Todas las leyes de la naturaleza en cualquier instante son las mismas en todos los sistemas coordinados inerciales.

Además de los postulados anteriores, fue obligatorio para la mecánica newtoniana precisar, sin dar pie a ambigüedad alguna, la terminología que sería desarrollada matemáticamente, haciéndose necesario dar las definiciones siguientes:<sup>73</sup>

- *Definición I:* La cantidad de materia (masa) es la medida de la misma que resulta de su densidad y tamaño (volumen) conjuntamente.
- *Definición II:* La cantidad de movimiento es la medida del mismo que resulta de la velocidad y la cantidad de materia conjuntamente.
- *Definición III:* La *vis insita* o fuerza de la materia es el poder de resistir, con la cual todo cuerpo, en tanto que está en él, continúa en su estado actual, sea que esté quieto o moviéndose uniformemente adelante en línea recta.
- *Definición IV:* Una fuerza imprimida es una acción ejercida sobre un cuerpo para cambiar su estado, bien de reposo, bien de movimiento uniforme en una línea recta.

Estas definiciones –algunas de ellas inevitablemente circulares–<sup>74</sup> marcan la pauta para sentar las bases de un estudio más apegado a una metodología experimental que se halla cada vez más afincada en los modelos matemáticos como principal atributo simplificador; con ello, Newton, inicialmente prendado del pensamiento geométrico cartesiano, emula el proceder de Galileo y se da a la tarea de dejar en claro el objeto de estudio de la física al separarla de la filosofía buscando, además, racionalizar la naturaleza al someterla a un conjunto de relaciones matemáticas. Igualmente, con tales definiciones, restringe el estudio de la física (o filosofía natural) sólo al ámbito de los

---

<sup>73</sup> Gamow, G. (1971): *Biografía de la física*; Biblioteca General Salvat; Salvat Editores; España, 1971. p. 55.

<sup>74</sup> Por ejemplo, en la primer definición se maneja la cantidad de materia como sinónimo de la masa. Inclusive, actualmente sólo se tienen definiciones operativas para ambas cantidades físicas, siendo sus unidades fundamentales: el *mol* para la cantidad de materia, y el *kilogramo* para la masa. Igualmente, la densidad de una sustancia se define como la cantidad de masa por unidad de volumen, es decir:  $\rho = dm/dV$ .

cuerpos materiales que no experimentan cambios en su apariencia. Como una manera de delimitar el campo de estudio de la física propone sus Reglas para Filosofar:<sup>75</sup>

- *Regla Primera:* No deben admitirse más causas de las cosas naturales que aquellas que sean verdaderas y suficientes para explicar los fenómenos.
- *Regla II:* Por ello, en tanto que sea posible, hay que asignar las mismas causas a los efectos naturales del mismo género.
- *Regla III:* Han de considerarse cualidades de todos los cuerpos aquellas que no pueden aumentar ni disminuir y que afectan a todos los cuerpos sobre los cuales es posible hacer experimentos.
- *Regla IV:* Las proposiciones obtenidas por inducción a partir de los fenómenos, pese a las hipótesis contrarias, han de ser tenidas, en filosofía experimental, por verdaderas exacta o muy aproximadamente, hasta que aparezcan otros fenómenos que las hagan o más exactas o expuestas a excepciones.

Estas cuatro reglas muestran que el genio era cauteloso y escéptico con respecto a posibles argumentos que emplearan causas incomprensibles u ocultas para explicar el acontecer natural; para él no era admisible cimentar el funcionamiento del mundo físico en especulaciones metafísicas y/o explicaciones complicadas pues “la Naturaleza es simple y no derrocha en superfluas causas de las cosas.”<sup>76</sup> Es reveladora la frase “*Hypotheses non fingo*”,<sup>77</sup> representativa de su oposición a especular, aunque aquí asumimos que él se refiere no a las hipótesis propias del método experimental, sino a aquellas que franquean el umbral de lo físicamente posible, es decir, hipótesis de carácter teológico o metafísico. Newton, al contrario que Galileo –que no se preocupó por las causas del movimiento–, introduce las causas que producen los cambios en el estado de movimiento de un cuerpo, y al hablar de las causas verdaderas y suficientes, alude solamente a aquéllas (causas) que efectivamente puedan contrastarse mediante procesos experimentales y/o procesos

---

<sup>75</sup> Newton, I.: *Principios matemáticos de la filosofía natural*, 2. Libro II y Libro III; Alianza Editorial, S. A.; Madrid, 1987. pp. 615-618.

<sup>76</sup> *Ibid.*, p. 616.

<sup>77</sup> Newton, I. (1729).pdf: *Mathematical principles of natural philosophy and his system of the world. Vols. II & III: The system of the world*; University of California Press. USA. p. 547. La referencia en el Scholium General dice textualmente: “I frame no hypotheses.” Es en el apéndice (p. 671) donde aparece como “*hypotheses non fingo*”.

deductivos que den razón del por qué de las cosas. El por qué de esta restricción puede deberse, quizá, a que Newton se percató de que conocer a fondo la realidad es difícil, por lo que optó por llegar a conocerla con base en sus manifestaciones, y a partir de ahí ir deduciendo los porqué del comportamiento, pero asumiendo que la realidad está representada por la ocurrencia de los sucesos, lo que nos da una idea de cómo es la realidad en sí, poniéndonos a salvo de especulaciones de diversa índole. Por ejemplo, si reiteradamente colocamos agua caliente en un recipiente que se encuentra a la intemperie, observamos que el agua se enfría, y esto ocurre de manera sistemática; por tanto, el evento nos da idea de cómo es la realidad en sí, y nos permite colegir que siempre que pongamos un cuerpo con una temperatura mayor que la del medio ambiente, el cuerpo se enfriará, porque la realidad se empeña en igualar las temperaturas.

Asimismo, es válido suponer que cuando Newton habla de la causa verdadera, de alguna manera asegura que el concepto fuerza es el agente dinámico verdadero y más elemental que subyace en la naturaleza, pues ésta (la fuerza) se constituye en el elemento teórico más intuitivamente claro y tangible –y quizá el más explicativo– que deja sentir (o ver) fácilmente sus efectos sobre los objetos; la fuerza sería, en todo caso, la causa verdadera que hace factible una explicación realista de los acontecimientos naturales, pues permite inferir muchas propiedades y comportamientos de los sistemas físicos.

Algo que vale la pena subrayar acerca de las definiciones de Newton es que en ellas aparecen perfectamente discriminadas las variables cinemáticas y las variables cinéticas asociadas al movimiento de los cuerpos; igualmente se manifiestan, de manera explícita, los conceptos de masa, inercia y fuerza. Con tal estructura conceptual perfectamente armonizada, y con el tiempo como variable indispensable para describir la evolución de los eventos, es cuestión de tiempo la inminente implantación en la física de la relación causal al asimilar la causa a la fuerza, idea ésta bastante plausible, pues la fuerza será *conditio sine qua non* para explicar los cambios naturales.

Ahora bien, es claro que para alcanzar sus metas, Newton –como Galileo– simplifica la naturaleza y la representa y trata matemáticamente –algo como lo que actualmente hace la simulación–, siendo por esta vía que infiere consecuencias que transferirá después al acontecer natural para someterlas a contrastaciones empíricas; esto, sumado a un

proceso de inducción riguroso,<sup>78</sup> es lo que le permite articular coherentemente su teoría del movimiento impulsando, indirectamente, una visión de la naturaleza semejante a un dispositivo mecánico que debe cumplir una función determinada, obligándola así a seguir una relación de causa–efecto. Aun así, Newton no se afaná por imponer la visión de un mundo determinista, sino que sólo se concretó a buscar explicaciones racionales y fácilmente comprensibles en términos de “las fuerzas de la naturaleza”;<sup>79</sup> por ello, consciente que su propuesta es una teoría más y puede no ser lo último, ni es infalible o mejor para explicar las causas de los acontecimientos, deja abierta la posibilidad a nuevos desarrollos teóricos al decir:

Como los antiguos consideraban la ciencia de la mecánica como de suma importancia en la investigación de las cosas naturales, y los modernos, rechazando las formas sustanciales y las cualidades ocultas, han procurado someter los fenómenos de la naturaleza a las leyes de la matemática, en este tratado he cultivado las matemáticas en cuanto que se relacionan con la filosofía (natural). [...] Yo considero la filosofía (natural) más bien que las artes y escribo tocante no a las fuerzas manuales, sino a las naturales [...] y, por tanto, ofrezco esta obra como los principios matemáticos de la filosofía (natural) porque todo el problema de la filosofía parece consistir en esto: partiendo de los fenómenos de los movimientos investigar las fuerzas de la Naturaleza y partiendo de éstas demostrar los demás fenómenos [...] Así pues, pretendo derivar [...] los fenómenos de la Naturaleza de principios mecánicos porque he sido inducido a sospechar que todo puede depender de ciertas fuerzas [...] Por ser desconocidas estas fuerzas, los filósofos han intentado en vano hasta ahora la investigación de la Naturaleza, pero espero que los principios aquí formulados arrojarán alguna luz bien a éste o a algún método más verdadero de filosofía.<sup>80</sup>

Como se ve, en el párrafo anterior se manifiesta la grandeza y humildad del genio. Ahora bien, para quien esto escribe, lo relevante de la teoría de Newton, además de permitir dar definiciones operativas de conceptos antes abstrusos, y de matematizar los eventos, es que abstrae la realidad y no sólo se contenta con dar una descripción de ella, sino que se aventura a ‘explicar’ el por qué del movimiento de las cosas, tal y como antes pretendiera hacerlo Aristóteles, pero simplificando la tarea al enfocarse a un subconjunto de la realidad –que son los objetos físicos–. Pero tal simplificación teórica va incluso más lejos pues nos lleva a plantear, de manera categórica, una realidad objetiva al acceder a una descripción equivalente del evento, independientemente del observador.

---

<sup>78</sup> En este caso, es posible asegurar que Newton era consciente de que la inducción era susceptible de modificar la teoría, pues, en caso de encontrar un evento que no se ajustara a los dictados teóricos, habría que revisarla a fondo. Uno de los casos de inducción más exitosos en la teoría clásica fue cuando Newton considera la masa de una partícula y después la hace extensiva a los objetos celestes. Gracias a ello pudo trasladar el concepto fuerza a otros ámbitos, más allá de las experiencias cotidianas comunes.

<sup>79</sup> Gamow., *op.cit.*, p. 54.

<sup>80</sup> *Ibidem.*, p. 54.

En efecto, para gobernar matemáticamente los acontecimientos físicos, la mecánica newtoniana hace legal el concepto de causa como el agente requerido para la ocurrencia de un evento, imponiendo con ello una visión mecanicista del mundo al considerar la realidad como un mecanismo autónomo que, si bien recibió un impulso divino inicialmente, después es capaz de proseguir por sí mismo al requerir de sólo un evento como (causalmente) necesario para la ocurrencia de otro; es decir, las leyes físicas concatenan los eventos y así no se demanda la injerencia de una deidad. Pero esto implica que las manifestaciones de la materia deben tener causas (ya obligatoriamente materiales) inmediatas, y a menos que otra causa intervenga, su comportamiento siempre será el mismo, según se infiere de las expresiones matemáticas involucradas en su estudio. Y por si no fuese bastante, aún podría admitirse que el determinismo, según la consideración de Newton, proviene del impulso inicial divino que el universo recibió, por lo que éste conserva, como heredad y en lo más profundo de su seno, tal normatividad que rige su comportamiento y que dicta un eslabonamiento de causas y efectos.

Pero por si no fuese suficiente, se encuentra que el determinismo fue subsumido en la mecánica clásica cuando ésta impuso el manejo de un referencial común a todos los fenómenos naturales; tal referencial lo constituyen, aunque separados entre sí, el espacio y el tiempo, ambos considerados absolutos, habiendo sido definidos por Newton como:

- I. El tiempo absoluto, verdadero y matemático, en sí mismo y por su propia naturaleza, fluye de una manera ecuable y sin relación alguna con nada externo, y se conoce también con el nombre de duración...
- II. El espacio absoluto, por su propia naturaleza y sin relación alguna con nada externo, permanece siempre similar e inmóvil...<sup>81</sup>

Y es que la introducción de estas cantidades de manera absoluta posibilita, a la vez que simplifica, establecer relaciones matemáticas de un evento al tomar en cuenta su localización unívocamente definida en un espacio invariable y el instante de su aparición en la coordenada temporal, también invariable, puesto que (el tiempo) avanza de la misma manera para todo observador del universo. Esto, aunado al conocimiento de las circunstancias y factores que fungieron como condiciones iniciales y que permanecen constantes una vez iniciado el evento, permiten pronosticar (o determinar) concreta y

---

<sup>81</sup> Newton, I. (1686): *Escolio de los Philosophiae naturalis principia mathematica*; en: Einstein, A., Grünbaum, A., Eddington, A. S. y otros (1978): *La teoría de la relatividad. Sus orígenes e impacto sobre el pensamiento moderno*; Selección de Williams, L. Pearce; Alianza Editorial. Madrid. 1978. p. 18.

precisamente qué estado guardará el cuerpo en un tiempo posterior cualesquiera. Hoy día, y gracias a la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica, sabemos que ni el tiempo ni el espacio pueden considerarse como entidades absolutas, pues dependen directamente de la velocidad de los móviles, además de que espacio y tiempo están fuertemente ligados entre sí. Igualmente, se muestra la no simultaneidad de los eventos, y se enfatiza la inexistencia de un observador privilegiado en el universo, lo que nos permite inferir que el movimiento como absoluto es inexistente, es decir, no es autocontenido pues, para hablar del movimiento, es menester contar con un marco de referencia. Asimismo, se ha encontrado que los cuerpos materiales pueden no tener una localización bien definida, tal y como suele ocurrir con los objetos atómicos. Todo ello ha permitido concluir que la teoría newtoniana sólo es una buena aproximación que permite describir el acontecer natural, pero a escala macroscópica y a bajas velocidades, estando impedida para hacerlo con objetos que se mueven a velocidades cercanas a las de la luz, o a nivel microscópico.

Aun con todo esto y considerando las limitantes anteriormente expuestas, podemos asegurar que en la mecánica clásica, si conocemos la totalidad de circunstancias que determinan un fenómeno, es posible predecir con grandes dosis de certeza los hechos que han de originarse necesariamente de ellas.

### **1.1.5 Laplace y el determinismo**

Fue sin duda la visión acerca de una naturaleza “mecánica” lo que permitió redimensionar el problema del determinismo, problema que pronto adquirió el carácter de grave para los filósofos, al encontrarse entre el dilema de rechazar las leyes de la mecánica newtoniana –validadas continuamente, altamente efectivas y con una enorme capacidad predictiva–, o verse a sí mismos como un engranaje sofisticado que forma parte de un sistema mecánico mayor.

Pero aún había más, pues mucho tiempo después Pierre Simón Laplace, impresionado por la teoría newtoniana y convencido de que tal teoría explicaba la realidad, concibió la mecánica clásica como el instrumento teórico que precisaba cómo era la naturaleza y cuáles eran las leyes que la regían. Laplace sugirió que las mismas fuerzas que ahora están actuando pueden haber obrado para separar los planetas de una inicial nebulosa

giratoria, llevando entonces el mecanicismo determinista y rigurosamente causal hasta sus últimas consecuencias, haciendo que el determinismo fuese total y absoluto.

Laplace aducía que si se conoce el estado actual de un sistema, es dable predecir con una precisión elevada –podría decirse que casi absoluta– cualesquier otro estado futuro (del sistema); esto le llevó a decir que a todo efecto le antecede una causa, relación conocida como “*relación de causa-efecto*”. Es, sin duda alguna, altamente significativa la formulación que aparece en su *Essai Philosophique sur les Probabilités*, 1819, al referir:

Debiéramos...considerar el presente estado del universo como el efecto de su estado anterior y la causa del que seguirá. Supongamos...una inteligencia que pudiera conocer todas las fuerzas que animan a la naturaleza, y los estados, en un instante, de todos los objetos que la componen... para [esta inteligencia] nada podría ser incierto; y el futuro, como el pasado, sería presente a sus ojos.<sup>82</sup>

En este párrafo hasta cierto punto eufórico, Laplace<sup>83</sup> hace gala de sus excelsos poder de observación y razonamiento deductivo que le llevan a inferir –y quizá a extrapolar, más allá de lo lógicamente permisible– el aparente determinismo que subyace en el comportamiento de la naturaleza. También, igual que antes Newton lo hiciera, exalta una deidad, pues bajo su concepción determinista, parece ser evidente que tal “inteligencia” o potestad superior es quien rige la naturaleza –sea macroscópica o microscópica– y que es capaz de fusionar el pasado y el futuro en un instante pudiendo, por tanto, predecir el ulterior comportamiento del sistema; es decir, implícitamente enuncia que en todo fenómeno natural la causa debe ser origen y/o motivo del consecuente efecto. Esto será viable siempre y cuando los sistemas físicos sean inmutables en el tiempo (que no cambien su constitución física), haciendo con ello posible conocer con absoluta certeza el comportamiento futuro de un evento a partir del conocimiento de cualquier estado anterior y del conocimiento de las leyes naturales.

Ahora bien, lo que Newton y Laplace proponían acerca de un mundo determinista absoluto no era nuevo, pues provenía de un sistema de creencias fuertemente inculcadas en Europa de tiempos lejanos, inclusive desde las épocas del esplendor de la cultura griega y su determinismo en ciernes. Siguiendo tal línea de pensamiento, es comprensible entender por qué para Laplace sería viable pensar que existe la posibilidad de una

---

<sup>82</sup> Popper, K. R. (1956): *El universo abierto. Un argumento a favor del indeterminismo. Post Scriptum a la Lógica de la Investigación Científica. Vol. II.*; Tecnos. España. 1996. p. 22.

<sup>83</sup>No deja de parecer irónico que Laplace, el principal apologista del determinismo, sea uno de los pioneros de la Probabilidad y la Estadística.

relación causa-efecto que impera en la naturaleza. Este tipo de razonamiento deductivo no es exclusivo de los científicos, sino que tal como vimos antes, proviene de la antigua Grecia pues, según Martínez "...en este marco pueden detectarse dos tipos importantes de tradiciones científicas en la Grecia antigua: las tradiciones que llamaremos teórico-especulativas y las tradiciones empíricas."<sup>84</sup> No es raro entonces que, al observar fenómenos repetitivos, se buscara una explicación científica de lo ocurrido, con silogismos convincentes y efectivos que tornaran la explicación en algo sencillo y claro; las leyes naturales que la mecánica newtoniana exalta terminan por posicionar en un sitio de honor el determinismo a lo largo de doscientos años, y simultáneamente sirven para desproveer del animismo el acaecer de los fenómenos en la naturaleza. Esta basificación de la relación causal en la teoría se asume como el principio más elemental del mundo a la vez que se erige también como el elemento que articula y estructura bien sea los conceptos teóricos o los procesos empíricos, amén de introducir en la ciencia una metodología que es, hasta cierto punto, rígida pero efectiva. Con esto se alcanza a cumplir una de las aspiraciones de los filósofos griegos pues, como Martínez expone:

Otros filósofos importantes en el desarrollo de esta tradición teórica son Pitágoras, Anaxágoras y Demócrito. De una manera diferente, cada uno de ellos elaboró la idea central de las tradiciones teóricas: el rechazo a factores explicativos sobrenaturales y la búsqueda de principios explicativos naturales de carácter general que permitieran dar cuenta de la experiencia de una manera inteligible. Estos filósofos no estaban interesados en la sistematización de datos de la experiencia como un fin importante de por sí, sino más bien en la función que esta sistematización ejercía en discusiones abstractas en las que contaban la economía y la consistencia de los argumentos, así como los principios en los que se basaban las teorías.<sup>85</sup>

Ahora bien, la teoría newtoniana finca la relación causal en la idea de fuerza, además de que dicha relación se interpreta como históricamente se ha hecho: como el equivalente de una sucesión de eventos que aparecen en orden secuencial, donde la causa y el efecto asumirían el papel de piñones en contacto. Y es que esto suele ser fácilmente intuitivo, pues el efecto se ve como una consecuencia de la causa –que sería, valga la expresión, el efecto neto de las (posibles) demás causas–, además de semejar una progresión unidireccional en el tiempo; es decir, dado que los eventos se hallan interactuando entre sí, sería igualmente posible establecer una acción que obra sobre ambos eventos (causa y efecto) pero que, bajo determinadas consideraciones físicas,

---

<sup>84</sup> Martínez, Sergio F. (2001): *De los efectos a las causas. Sobre la historia de los patrones de explicación científica*; UNAM-Paidós. p. 30.

<sup>85</sup> *Ibid.*, p. 30.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

tiene una dirección preferencial de avance, semejante al movimiento de las fichas de dominó cuando se colocan una junto a la otra y experimentan un impulso que las tira; esta dirección preferencial podría asociarse con el menor tiempo de reacción del evento transmisor (respecto del evento reflejado), la inercia del medio y el concepto de trabajo (que nos conduce al principio de mínima acción), por ser quienes propician la transmisión de la causa 'hacia adelante' y no hacia atrás o los lados. Podemos pensar en esto utilizando la analogía ya expuesta de las fichas de dominó, y para ello podemos suponer que tenemos  $n$  fichas de dominó dispuestas, en forma erguida, una después de la otra; por comodidad, supondremos que las fichas están de pie sobre un piso horizontal bajo condiciones semi-ideales (no están sujetas al piso por ningún dispositivo o pegamento, no hay resistencia del aire y hay poca fricción, lo que origina posibles momentos de rotación) y que los choques son elásticos, para evitar pérdidas de energía. Si a la primera ficha de dominó se le proporciona un pequeño impulso hacia adelante (o una pequeña fuerza que modifique su estado de reposo) entonces se inclinará en la dirección en que se aplicó la fuerza, por lo que antes de caer chocará con la ficha que le sucede, y ésta con la siguiente, y así sucesivamente. La cuestión importante no es cómo se mueven las fichas propagando la cantidad de movimiento, si no que al momento del choque, y por cuestiones de inercia, una ficha se impulsa hacia adelante y la otra debería rebotar hacia atrás, cosa que no hace debido a la inclinación que adquirió, siendo esta deflexión de su posición de equilibrio la causal que impide que pueda erguirse nuevamente en sí, por inercia, y porque no hay una contratorque que contrarreste la torque debida al peso. Asimismo (y por economía energética), a la partícula que está cayendo le llevaría más tiempo y más esfuerzo restituir a su posición inicial –antes de la colisión– e inclinarse en dirección opuesta a la de la propagación, o derivar hacia otro lado, optando entonces por dejarse caer una vez transmitido el impulso. En este sentido, y como explicación de por qué cayeron cada una de las fichas, diríamos que hubo una causa, secuencial y preferencial, que ocasionó que cada ficha cayera hacia delante, golpeando a la ficha adyacente, y así sucesivamente; es decir, habremos visto cómo es que la causa se ha propagado en un sentido, pero haciéndolo progresiva y paralelamente a la dirección temporal y más todavía, pues siempre veríamos que la causa antecede al efecto.

Este sencillo experimento puede ilustrar y hacernos ver cómo es que hemos construido mentalmente el basamento en que se levanta la teoría newtoniana, y es dicha edificación intelectual el soporte que suponemos, gobierna el comportamiento natural y da cuenta del

porqué ocurren los fenómenos en la naturaleza; esta relación causa–efecto<sup>86</sup> la suponemos válida en el *continuum* de los sucesos naturales. Empero, el determinismo no aclara apropiadamente cuál puede ser el origen de la causa, y tampoco se preocupa por dar cuenta de la clase de su naturaleza (divina, natural, humana, etc.). Por tanto, para el determinismo cualquier cosa podría asumir el rol de causa y a su vez, producir un efecto.

Así, y sumariamente, podría decirse que el determinismo puede admitirse como si fuese ese “algo” inherente a todos los acontecimientos del universo o bien, como si hubiese un antecedente propio de algún fenómeno natural que determina cómo funciona y cuál será su evolución conforme transcurra el tiempo.

En lo que se refiere a la conducta humana, y a su consecuente relación con la libertad, existen posturas deterministas radicales que proponen que, al igual que lo que sucede con los fenómenos naturales, las acciones humanas también están sujetas, al menos desde un punto de vista individual, a un patrón determinista donde los motivos, aspiraciones, sueños, pasiones e incluso, posibles acciones, adoptarían el papel de las causas que, a su vez, se traducirían en una toma de decisiones que se desembocarían en otras acciones o efectos que tienden a conformar una malla causal rigurosa.

Pero para que un sistema<sup>87</sup> sea determinista, habrá de limitársele pues la posible interacción con otros sistemas podrían afectar la observación o introducirían perturbaciones que son difíciles de “cuantificar”; así, de la misma manera que lo que se hizo en un sistema físico,<sup>88</sup> habría que imponer ciertos supuestos básicos que permitan estudiar –y conjeturar acerca de su ulterior desarrollo– y manipular al sistema, que en este caso sería la conducta humana–, siendo éstos: (a) debe contarse con un conjunto de axiomas y con un sistema de medida estándar y confiable, pues esto permitirá ir construyendo la teoría; (b) el sistema debe constreñirse y definir totalmente sus fronteras –y qué tipo de fronteras son– de tal suerte que pueda manejarse como el análogo a un sistema cerrado; (c) debe imponerse cierto orden a las cantidades (conductuales)

---

<sup>86</sup> Aquí, dado que es prácticamente imposible definir con claridad y precisión el término causa, por ser uno de los conceptos primeros, más generales y universales, llamaremos, como Santo Tomás, “principios” a las causas “extrínsecas” –que actúan sobre las cosas–, es decir, la causa eficiente y la causa final. Santo Tomás relaciona la noción de causa con las nociones de principio y elemento. Por una parte, toda causa es principio, aunque no todo principio es causa... Asimismo, define causa como: “aquello de lo que necesariamente se sigue algo” o también, como “aquello de cuyo ser” se sigue algo, correspondiendo a la noción de principio – pues es lo que origina alguna cosa”. (Tomado de: Beuchot, M. (1987); *Conocimiento, Causalidad y Metafísica*; Universidad Veracruzana, Xalapa; México. pp. 109-110).

<sup>87</sup> Aquí se maneja el término “sistema” de acuerdo a la definición operativa de la física: *sistema es una porción finita de materia que se aísla del resto del universo con fines de estudio.*

<sup>88</sup> Vea los postulados, página 30 de este documento.

resultantes, fijando para ello un cero u orden “absoluto”; (d) debe admitirse si el tiempo será el único parámetro a considerar, o será necesario introducir otras variables de estado (por ejemplo: voluntad, inteligencia, grado de independencia, carácter, etc.) para fijar así las condiciones iniciales del sistema. Bajo estas premisas, habría que determinar si las mediciones serán secuenciales o aleatorias; igualmente, habría que instituir la manera de expresar funcionalmente el comportamiento del sistema, y sobre todo, (e) buscar la repetitividad y predictibilidad de los eventos, aunque aquí la predictibilidad no sea tan relevante, puesto que lo mismo se busca predecir en un suceso de carácter determinístico que en uno estocástico.

Como se ve, aún hoy día no se tiene algo de esto, y la conducta humana sigue siendo un problema difícil de solucionar.

### **1.1.6 Embates de la física al determinismo**

Después de un sinnúmero de éxitos de la física clásica, la mayoría de científicos de prácticamente todas las esferas del saber consideraban, incluso hacia las postrimerías del siglo XIX, que todo el edificio del conocimiento –sobre todo el de la física– estaba sólidamente construido y prácticamente terminado, restando únicamente afinar algunos pequeños detalles, entre los que se encontraban el aumento en el grado de precisión de los experimentos; el supuesto era que una vez subsanados los detalles que faltaban, todo quedaría perfectamente bien comprendido y explicado.

Pero con el advenimiento del siglo XX apareció en el horizonte de la física una teoría sumamente novedosa: la teoría de la relatividad, que vino a modificar sustancialmente la visión que de la naturaleza macroscópica (a escalas astronómicas) se tenía, ampliando con ello el marco conceptual del ser humano.

La Teoría de la relatividad retomó el estudio de sistemas en movimiento relativo entre sí –problema estudiado por Galileo, conocido como la relatividad galileana– pero con cuerpos que se desplazan a grandes velocidades, cercanas o comparables a la de luz. Rompe con la mecánica clásica al desechar los marcos de referencia absolutos y al admitir la inexistencia de un tiempo y un espacio absolutos, característicos de la mecánica newtoniana. Postula también que en el Universo no existe un observador inercial privilegiado y que la velocidad de la luz es constante –con un valor de aproximadamente,

3.0 × 10<sup>8</sup> m/s– viajando en el vacío.<sup>89</sup> Sin embargo, esta teoría, a pesar de introducir conceptos novedosos y fácilmente verificables empíricamente, mantiene vigente el determinismo, puesto que la precedencia del tiempo permanece inalterable, y con ella la causalidad de los eventos. Así, es claro que a pesar de que el tiempo no es absoluto, sí lo es el devenir temporal, al ser independiente de los observadores inerciales.

Pero no sólo la teoría de la relatividad mantuvo el determinismo, sino que con el desarrollo de las demás ciencias se fueron dando nuevas adhesiones y visos de apoyo al determinismo científico. Por ejemplo, para Claude Bernard, considerado el fundador de la biología científica “hay que admitir como axioma experimental que, tanto en los seres vivos como en los cuerpos brutos, las condiciones de todo fenómeno están determinadas de una manera absoluta [...] La negación de esta proposición no sería otra cosa que la negación de la ciencia misma.”<sup>90</sup> De igual modo, y quizá con mayor contundencia se expresa E. Goblot, para quien “en la naturaleza no hay ni contingencia, ni capricho, ni milagro, ni libre albedrío; cada una de estas hipótesis arruina en nosotros la facultad de razonar sobre las cosas.”<sup>91</sup>

Las anteriores opiniones muestran que la doctrina determinista puede sobredimensionar la racionalización que hacemos de lo real, pues al desear dar una explicación de los fenómenos, éstos los representamos como el equivalente a un diagrama de flujo, donde se manifiestan con toda claridad las causas y los efectos aunque, en dicho diagrama, se dé un pequeño margen de acción debido a los errores asociados al modelo. Pero podríamos preguntarnos con toda seriedad si el determinismo no es más que una construcción mental que elaboramos con la intención de representar los acontecimientos, y simultáneamente, habría que cuestionar si tal representación efectivamente establece una correspondencia uno a uno entre el evento y lo modelado. Ahora bien, decirlo es fácil, pero es muy complicado llegar a decidir por una u otra opción, por la razón de que desconocemos, parafraseando a Newton, cuál es la verdadera causa de la ocurrencia de tal o cuál fenómeno. Newton, ya sabemos, se inclinó por la

---

<sup>89</sup> Esto puede formularse así:

**Postulado 1 (Principio de la relatividad):** *Las leyes de la física son las mismas en todos los marcos de referencia inerciales.*

**Postulado 2 (Principio de la constancia de la velocidad de la luz):** *La velocidad de la luz en el espacio libre, tiene el mismo valor c en todos los marcos de referencia inerciales.* (Resnick, R.; Halliday, D. & Krane, K. S. (2002); *Física, Vol. 1*; CECSA; México; p 453).

<sup>90</sup> Tomado de [http://www.La.construcción.científica.de.la.realidad\\_Determinismo.e.indeterminismo\\_El.postulado.de.la.objetividad.htm](http://www.La.construcción.científica.de.la.realidad_Determinismo.e.indeterminismo_El.postulado.de.la.objetividad.htm). La página actualizada es:

[http://www.oposinet.com/filosofia/temas/oposiciones\\_filosofia\\_T10.php](http://www.oposinet.com/filosofia/temas/oposiciones_filosofia_T10.php).

<sup>91</sup> *Idem.*

matematización de la realidad al considerar –o eso pienso que él hizo– que este tipo de representación es, quizá, el único camino seguro que puede conducirnos a objetivarla, pues si la realidad la consideramos representada fielmente por los fenómenos naturales y se puede axiomatizar, apoyada en leyes naturales que se infieren a partir de hechos repetibles y comprobables, y en símbolos que adquieren un valor previamente consensuado por las sociedades, entonces la representación simbólica del acontecer natural será comprendido (e independiente) por quien la estudie. Esto es algo interesante de reflexionar aun cuando el determinismo podría inducirnos a pensar que la realidad funciona como lo hace porque ha sido previamente programada con alguna intencionalidad en particular. Pero tal supuesto plantea una serie de conflictos, sobre todo porque incide directamente en la libertad humana, puesto que en caso de existir el determinismo, aparentemente la libertad humana es inexistente. Es así que el determinismo ha sido seriamente cuestionado desde todos los ángulos posibles y desde todas las áreas inimaginables.

Inclusive desde el interior de la física el determinismo ha sufrido fuertes y dolorosos embates, siendo encabezados por la mecánica cuántica. Inicialmente los ataques parecieron provenir de la termodinámica y de la teoría cinética, al buscar explicación al comportamiento de los gases, aunque rápidamente retomaron el camino determinista propio de la física clásica. Pero quien se ha constituido en punta de lanza contra el determinismo es la mecánica cuántica, y lo ha hecho tan convincentemente que, en la actualidad, parece ser que hay más personas que se inclinan por una naturaleza no determinista que aquéllas que defienden la tesis determinista.

## **1.2 Tipos de Determinismo**

### **1.2.1 Determinismo religioso y metafísico**

En el *Universo Abierto*, Popper asegura que

La idea intuitiva del determinismo puede resumirse diciendo que el mundo es como una película de cine: la fotografía o la escena que está proyectándose es el *presente*. Las partes de la película que ya se han proyectado constituyen el pasado. Y las que aún no se han proyectado constituyen el futuro.

En la película, el futuro coexiste con el pasado; y el futuro está fijado, exactamente, en el mismo sentido que el pasado. Aunque el espectador no conozca el pasado, todo suceso futuro, sin excepción, podría en principio conocerse con certeza, exactamente como el pasado, puesto que existe en el mismo

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

sentido en el que existe el pasado. De hecho, el futuro es conocido para el productor de la película, para el creador del mundo.<sup>92</sup>

Para él, el determinismo surge como una necesidad del hombre por dar una explicación a los acontecimientos que observaba en la naturaleza, y dado que no tenía una explicación racional (de carácter científico) satisfactoria acerca de la ocurrencia de tales eventos, supuso que los causantes son los dioses. El determinismo primitivo –que después es seguido por casi todas las religiones– es de origen religioso.

Pero Popper va más allá, al dividir el determinismo en tres grandes categorías: el determinismo religioso, el determinismo científico y el determinismo metafísico. Para este filósofo “El determinismo religioso está relacionado con las ideas de divina omnipotencia –poder total para determinar el futuro– y divina omnisciencia, que entrañaba que el futuro es conocido por Dios ahora, y por tanto, cognoscible de antemano y fijado de antemano”.<sup>93</sup> En tanto que

Históricamente, se puede considerar la idea de un determinismo «científico» como el resultado de sustituir la idea de Dios por la idea de naturaleza, y la idea de ley divina por la de ley natural. La naturaleza, o quizá «la ley de la naturaleza», es omnipotente y omnisciente. Todo lo fija de antemano. Al contrario que Dios, que es inescrutable, y a quien sólo puede conocerse a través de la revelación, las leyes de la naturaleza pueden ser descubiertas por la razón humana. Y si conocemos las leyes de la naturaleza podemos predecir el futuro a partir de los datos presentes por métodos puramente racionales.<sup>94</sup>

Por otra parte, asegura que el determinismo metafísico es aquél que

...afirma sencillamente que todos los sucesos de este mundo son fijos, o inalterables, o predeterminados. No afirma que sean conocidos por nadie; o predictibles por métodos científicos. Pero afirma que el futuro es tan inmutable como el pasado. Todos sabemos lo que quiere decir que no se puede cambiar el pasado. Es en este mismo sentido, precisamente, en el que el futuro no puede cambiarse, según el determinismo metafísico.

El determinismo metafísico, claramente, no es contrastable. Porque incluso aunque el mundo nos sorprendiera constantemente y no diera ninguna señal de predeterminación ni de regularidad siquiera, el futuro podría seguir estando predeterminado e incluso ser conocido para aquellos capaces de leer el libro del destino.<sup>95</sup>

---

<sup>92</sup> Popper., *El universo abierto...* p. 28.

<sup>93</sup> *Ibid.*, p. 29.

<sup>94</sup> *Idem.*

<sup>95</sup> *Ibid.*, p. 31.

Ahora bien, generalmente se admite que el determinismo metafísico (o filosófico) afirma que también las decisiones humanas se hallan sometidas al determinismo universal y que, al igual que cualquier fenómeno de la naturaleza, la conducta humana obedece a leyes causales. Pero una afirmación de esta índole parece negar la existencia del libre albedrío; ahora, si se plantea en términos de la libertad, podría decirse que si el ser humano es libre de actuar, entonces se niega el determinismo universal.<sup>96</sup>

Sin embargo, que el proceder del hombre quiera –o pueda– predecirse no implica que deba existir una coerción de alguna índole en particular, puesto que la libertad le ha sido dada –o la ha ganado– y se pierde cuando se actúa bajo coacción o condicionamiento (que incluso puede ser de *motu proprio*, de orden legal, psicológico, etc.); es decir, que puede provenir de factores externos o internos, además de la propia incertidumbre asociada a las mediciones. Aún así, es imposible predecir si esto elimina la posibilidad de que el comportamiento humano pueda predecirse en un futuro no muy lejano.

### 1.2.2 Determinismo científico

Para Laplace, el mundo estaba constituido por corpúsculos interactuando entre sí de acuerdo a las leyes de la mecánica newtoniana. Ahora, si se quisiera conocer el estado<sup>97</sup> del sistema en cualquier instante  $t$ , tendrían que conocerse completamente sus condiciones iniciales; esto permitiría predecir el comportamiento del sistema en cualesquier tiempo posterior  $t'$ , es decir,  $t < t'$  (dado que el tiempo es monótonamente creciente, es decir,  $t_0 < t_1 < \dots < t_n$ ). Evidentemente, el número de variables involucradas puede ser incuantificable (por ser un sistema de partículas) y la labor descriptiva de la evolución del sistema sería un trabajo sobrehumano. Fue por ello que Laplace imaginó a un demonio –como una inteligencia superior al hombre– capaz de averiguar el conjunto completo de las condiciones del sistema en cualquier instante. Así, con las condiciones iniciales y las leyes naturales –y apoyándose en las ecuaciones de la mecánica– el demonio podría deducir todos los estados futuros del sistema. Este experimento mental de Laplace exhibe que, de conocerse cabalmente las leyes de la naturaleza, entonces el

---

<sup>96</sup> Sin embargo, creo que aquí se fusionan cosas que pueden ser distintas, puesto que la libertad depende de la voluntad, y no tiene nada que ver con el determinismo del mundo físico.

<sup>97</sup> Por estado del sistema significamos el conocimiento de todas las variables necesarias para la descripción (del sistema), por ejemplo: posición, masa, velocidad, dirección del movimiento, fuerza, presión, temperatura, etc.

futuro del sistema estaría implícito en cualquier instante de su pasado; esto es precisamente una manera de concebir al determinismo.

Ahora bien, el demonio laplaciano, metafóricamente hablando, sería un científico más que trabaja con un sistema, conoce sus condiciones iniciales y las teorías que gobiernan su comportamiento, que una deidad. Popper alude al demonio en los mismos términos, al expresar

El punto crucial del argumento de Laplace es éste: *Hace de la doctrina del determinismo una verdad de la ciencia y no de la religión*. El demonio de Laplace no es un Dios omnisciente, sino simplemente un supercientífico. No se le supone capaz de nada que no puedan hacer los científicos humanos, o al menos que no puedan hacer aproximadamente: simplemente se le supone capaz de realizar sus tareas con perfección sobrehumana.<sup>98</sup>

Además, el mismo Popper renombra o tipifica las teorías del tipo que “respondan plenamente al propósito de Laplace pueden ser denominadas «deterministas *prima facie*»”,<sup>99</sup> donde

una teoría es determinista *prima facie* si, y sólo si, nos permite deducir –a partir de una descripción matemáticamente exacta del estado inicial de un sistema físico cerrado que se describe en términos de la teoría, la descripción, con cualquiera que sea el grado finito de precisión estipulado, del estado del sistema en cualquier instante dado del futuro.<sup>100</sup>

Asimismo, la idea del determinismo puede vislumbrarse más fácilmente, de acuerdo a la sugerencia de Popper, con la ayuda de la película que muestra los estados sucesivos del mundo. Tomando esto en cuenta

Podríamos decir que el determinismo “científico” es consecuencia del intento de sustituir la vaga idea de conocimiento anticipado del futuro por la idea más precisa de predictibilidad de acuerdo con los procedimientos científicos racionales de predicción. Es decir, el determinismo afirma que el futuro puede deducirse racionalmente a partir de las condiciones iniciales pasadas o presentes en unión de teorías universales verdaderas.<sup>101</sup>

Así que este filósofo propone que el determinismo científico se podría definir como:

la doctrina que dice que el estado de cualquier sistema físico cerrado en cualquier instante futuro dado puede ser predicho, incluso desde dentro del sistema, con cualquiera que sea el grado estipulado de

---

<sup>98</sup> *Ibid.*, p. 53.

<sup>99</sup> *Ibid.*, p. 54.

<sup>100</sup> *Idem.*

<sup>101</sup> *Ibid.*, p. 55.

precisión, mediante la deducción de la predicción a partir de teorías, en conjunción con condiciones iniciales cuyo grado de precisión requerido puede calcularse siempre (de acuerdo con el principio de poder dar razón) si la tarea de predicción es dada.<sup>102</sup>

aduciendo que esta definición es débil. Empero, añadiéndole que “el requisito de que pueda predecirse, de cualquier estado dado, si el sistema en cuestión estará alguna vez en ese estado o no”,<sup>103</sup> considera que se tendría una versión fuerte del determinismo científico.

### 1.3 Nacimiento del Indeterminismo

Tal y como hemos visto, el determinismo se relaciona estrechamente con una concepción mecanicista del universo, al considerar que la naturaleza posee un comportamiento similar al de una máquina. Históricamente, se puede considerar que el determinismo científico surge como una respuesta de los físicos para eliminar la idea de las leyes divinas a la hora de explicar la ocurrencia de los eventos, lo que les condujo a proponer las leyes naturales. Pero en un suceso natural, pareciese que todo sigue un guión definido de antemano, aunque esto depende de las condiciones iniciales, que son únicas para cada evento. Así pues, es inmediato pensar que la naturaleza está sujeta a determinadas leyes que gobiernan el devenir de los acontecimientos, y que (tales leyes) pueden ser descubiertas por medio de la experiencia y del razonamiento. Es así que para la postura determinista, si conocemos las leyes de la naturaleza, podemos predecir el futuro a partir de los datos presentes por métodos puramente racionales, dado que todo suceso en el universo está predeterminado. ¿Pero qué ocurre si hubiese un suceso que no lo esté? ¿Habría que rechazar el determinismo por eso?, es decir, ¿el determinismo deja de ser válido? Es de pensar que si hubiese un sólo suceso futuro en el universo que no pudiera predecirse, o si se encontrara un sitio donde las leyes naturales dejaran de valer, habría que rechazarlo en principio, y buscar el por qué no se cumplen las leyes naturales.

Hume, al indagar sobre la Teoría de las ideas, cae en este tipo de problemas, llegando a cuestionar la relación causa-efecto; así, enuncia

Parecería plausible decir que nadie podría siquiera entender en qué consiste el hecho de que algo ocurra, o el de que algo comience a existir, si no creyera también que tuvo una causa. Desde este punto

---

<sup>102</sup> *Ibid.*, p. 59.

<sup>103</sup> *Ibid.*, p. 59.

de vista, saber o creer que algo comenzó a existir implicaría necesariamente creer que alguna otra cosa existía y que ésta fue su causa. Esto significaría aceptar el principio causal tradicional según el cual todo lo que comienza a existir debe tener una causa de su existencia.<sup>104</sup>

Sin embargo, al reflexionar sobre las creencias acerca de los hechos que la gente tiene, así como de su percepción temporal, Hume centra su atención en la actuación y la deliberación, y en los probables cursos de acción posibles. Puesto que las acciones aún no han ocurrido, sus consecuencias tampoco se han presentado, por lo que cualquier creencia que sobre ellas se tenga, reflexiona, deberá referirse a algo “ausente”. Propone entonces que

Si se preguntara a un hombre por qué cree en un algún hecho que no presencia –por ejemplo, que su amigo está en el campo o en Francia–, daría una razón; y esta razón sería algún otro hecho, tal como una carta que recibiera de él, o el conocimiento de sus propósitos y promesas anteriores [...] Todos nuestros razonamientos relativos a hechos son de la misma naturaleza. Y en ellos se supone constantemente que hay una conexión entre el hecho presente y aquel que se infiere de él. Si no hubiera nada que los uniera, la inferencia sería totalmente incierta.<sup>105</sup>

Así pues, creemos que hay un vínculo entre el hecho que observamos y la situación que pensamos que guarda lo no observado al presente, infiriendo así una cosa de la otra. Inicialmente, Hume cree que esto se debe a “inferencias causales” o razonamientos fundados en una relación causa y efecto, pues “Es imposible razonar de un modo correcto, sin comprender perfectamente la idea sobre la cual razonamos; y es imposible comprender perfectamente alguna idea, sin seguirla hasta su origen y examinar la impresión primaria de la cual surge”.<sup>106</sup> Es así que, buscando con mayor detenimiento el origen de la idea de causalidad, Hume se da a la tarea de indagar qué son la causa y el efecto, enunciando que

En primer lugar, encuentro que cualesquiera objetos considerados como causa o efectos son contiguos, y que nada puede actuar en un tiempo o en un espacio separados, por poco que sea, de los que corresponden a su existencia. Aunque a veces parezca que objetos distantes pueden producirse unos a otros, al examinarlos se halla, por lo común, que están conectados por una cadena de causas, las cuales son contiguas entre sí y respecto de los objetos distantes; y si en algún caso particular no podemos descubrir esta conexión, suponemos empero que existe.<sup>107</sup>

---

<sup>104</sup> Stroud, B. (1995); *Hume*; Colección Filosofía Contemporánea; Instituto de Investigaciones Filosóficas, UNAM; México. pp. 70-71.

<sup>105</sup> *Ibid.*, p. 66.

<sup>106</sup> *Ibid.*, p. 66.

<sup>107</sup> *Ibid.*, p. 67.

Es claro entonces que Hume supone, en primera instancia, que hay una causalidad presente en el acontecer natural, y que todas las inferencias que nos llevan de lo observado a lo no observado tiene como sustento una relación causal, es decir, que si ocurre un evento C (de causa), entonces ocurrirá un evento E (de efecto); o dicho en la manera habitual: todo evento debe tener una causa. Sin embargo, al profundizar en sus reflexiones, se percata de que no necesariamente se cumple que si E ha acontecido es porque C ha ocurrido. Es este razonamiento el que pone en tela de juicio la validez del principio de causalidad, al no encontrar justificación alguna para su generalización, asegurando que

todos nuestros razonamientos relativos a causas y efectos no se derivan más que de la costumbre; y de que la creencia es más propiamente un acto de la parte sensitiva de nuestra naturaleza, que un acto de la parte cogitativa (p. 183)

Acaso al final saldrá a la luz que la inferencia no depende de la conexión, sino que la conexión necesaria depende de la inferencia. (p. 88).<sup>108</sup>

La conclusión, no hay duda, es tajante y demoledora, siendo –para Hume– únicamente la observación reiterada de los fenómenos naturales, y su desenvolvimiento por etapas (o conjunción, como la denomina) lo que nos lleva a inferir la idea de la causalidad o de conexión necesaria.

## 1.4. El Indeterminismo científico

### 1.4.1 Tipos de indeterminismo: religioso y metafísico

La reacción a las posturas deterministas es lo que suele conocerse con el nombre de indeterminismo. Esta doctrina niega que todo lo que sucede en la naturaleza tenga una causa, además de que pueden tenerse acontecimientos sin que esté involucrada la necesidad de la ocurrencia. Al igual que al determinismo, también se lo clasifica en indeterminismo religioso, metafísico y científico, que son los más conocidos.

Se tiene pues, como indeterminismo religioso a aquellas doctrinas, según Popper, en que al menos algunos acontecimientos no están fijados de antemano.<sup>109</sup> El mismo autor aduce que el indeterminismo religioso es verdadero, puesto que, al haber algún suceso

<sup>108</sup> *Ibid.*, pp. 114 y 115, para cada cita, respectivamente.

<sup>109</sup> *Ibid.*, p. 29.

(futuro) que no esté predeterminado, el determinismo debe ser rechazado, y en consecuencia, el indeterminismo sería verdadero.

En lo que respecta al indeterminismo científico, Popper expone, en esencia, el mismo argumento, asegurando que, en caso de que no todo fenómeno natural pueda ser predicho por la ley natural (vigente), o bien, en caso de que se encuentre algún evento que no pueda ser explicado en su devenir temporal –tal y como se hace con acontecimientos de la misma especie que el que está bajo observación– por la ley natural, será evidente que el determinismo científico falla, y por ende, debe ser rechazado.

Respecto del indeterminismo metafísico (por oposición al determinismo metafísico), Popper asegura que no es contrastable “Porque incluso aunque el mundo tuviera una apariencia totalmente regular y determinista, ello no establecería que no existiera ningún suceso no determinado de ningún tipo.”<sup>110</sup>

Popper, al considerar como “débil lógicamente” al determinismo metafísico, implícitamente admite que su opuesto también debe serlo, dado que carecen de contrastabilidad o contenido empírico, por lo que este tipo de determinismo –o indeterminismo– serían implicados bien sea por el determinismo religioso o por el determinismo científico, dándose el mismo caso con el indeterminismo. Ahora bien, aun cuando considera que esta clase de determinismo –metafísico– es irrefutable (por su debilidad y su incontrastabilidad empírica) eso no excluye la posibilidad de que haya argumentos imposibles bien sea a favor o en contra, y para ello lo vincula fuertemente con el determinismo científico, por ser éste quien le sirve de sustento; *ergo*, si falla el determinismo científico, también lo hará el determinismo metafísico. El mismo caso vale para los respectivos indeterminismos.

#### **1.4.2 El indeterminismo científico**

La conclusión de Hume, y su impecable desarrollo lógico resultó ser una losa muy pesada y difícil de mover para los defensores del determinismo. De hecho, tal conclusión es una de las razones que Popper esgrime siempre para atacar al determinismo científico. En el Conocimiento Objetivo, plantea:

---

<sup>110</sup> *Ibid.*, p. 31.

Hume estaba interesado por la condición del conocimiento humano o, como él diría, por el problema de si nuestras creencias (o, al menos, algunas de ellas, se pueden justificar con razones suficientes. Planteó dos preguntas, una lógica ( $H_L$ ) y otra psicológica ( $H_{Ps}$ ), con la característica importante de que sus respuestas chocan entre sí de algún modo. La pregunta lógica es la siguiente:

$H_L$ : ¿Cómo se justifica que, partiendo de casos (reiterados) de los que tenemos experiencia, lleguemos mediante el razonamiento a otros casos (conclusiones) de los que no tenemos experiencia?[...] La pregunta psicológica es la siguiente:

$H_{Ps}$ : ¿Por qué, a pesar de todo, las personas razonables esperan y creen que los casos de los que no tienen experiencia van a ser semejantes a aquellos de los que tienen experiencia? Es decir, ¿Por qué confiamos tanto en las experiencias que tenemos?<sup>111</sup>

Las respuestas que Hume da a las preguntas ya las conocemos, y son: no existe ninguna justificación, salvo la costumbre.

Es así que Popper continúa por la misma senda de Hume, exponiendo argumentos que apuntan directamente al centro de flotación del determinismo científico, esgrimiendo que nuestras teorías no son más que “redes creadas por nosotros para atrapar el mundo... Las teorías no son sólo instrumentos. A lo que aspiramos es a la verdad.”<sup>112</sup> Esto motiva que Popper proponga un argumento lógico a favor del indeterminismo: la imposibilidad de la autopredicción. En él, arguye el filósofo, si poseyéramos un conocimiento teórico perfecto, y bien definidas las condiciones iniciales, se podría predecir, deductivamente, los estados futuros de cada persona. Pero esto es absurdo, puesto que nos llevaría a una teoría con contradicciones internas.<sup>113</sup> Esto es lo que ocurre cuando se estudia el determinismo laplaciano y se intenta justificarlo totalmente, puesto que la naturaleza no exhibe un comportamiento lo bastante uniforme como nos gustaría (o bien, desconocemos nuevamente todos los factores que nos permitirían realizar una predicción, es decir, no tenemos a la mano un demonio de Laplace). Hacking lo expone con toda claridad: es más viable manejar certezas estadísticas que certezas absolutas, y con ello, el determinismo falla. Así lo expone

¿Cómo debía entender uno la estabilidad estadística en un universo laplaciano, en un universo en el que un espíritu convenientemente informado sería capaz de calcular todos y cada uno de los futuros sucesos partiendo de una exposición completa del estado de cosas en el universo y en un determinado momento? Laplace había dicho que la probabilidad es en parte el resultado de nuestro conocimiento y en parte el resultado de nuestra ignorancia<sup>114</sup>.

<sup>111</sup> Popper, K. R. (1982): *Conocimiento Objetivo. Un enfoque evolucionista*; Ed. Tecnos. Madrid. pp. 17-18.

<sup>112</sup> Popper., *El Universo abierto...* p. 65.

<sup>113</sup> *Ibid.*, pp. 64-100.

<sup>114</sup> Hacking., *La domesticación...* p. 165.

Por su parte, y como colofón, al estudiar el comportamiento de los eventos subatómicos, la física clásica se encuentra imposibilitada de llevar a cabo una predicción satisfactoria empleando la mecánica newtoniana; para llevar a cabo este cometido, se instituye la mecánica cuántica que introduce dos ideas esenciales para describir los eventos del microcosmos: la primer idea conlleva el derrumbamiento de la certeza –tan característica de la física clásica–,<sup>115</sup> al encontrar que la posición de una partícula atómica no puede determinarse con precisión en sitios o en tiempos definidos, siendo necesario introducir conceptos estadístico-probabilísticos para hacerlo, propiciando con ello que el manejo de la probabilidad sea un elemento fundamental para la comprensión y explicación del acontecer atómico, y exaltando nuevamente, la indeterminación. Veladamente, esto lleva a afirmar que en la naturaleza no existen leyes naturales, sino leyes estadísticas.<sup>116</sup>

La segunda idea no dejó de causar sorpresa al proponer que un observador, al estudiar un evento atómico, ocasiona una perturbación en el desarrollo del fenómeno bajo estudio, llevándonos a una relación, tal vez directa: fenómeno cuántico–observador, lo que inevitablemente nos regresa al subjetivismo.

Con base en lo anterior, el indeterminismo retoma un nuevo impulso, pues es catapultado y establecido sin ambages vía la postulación de los Principios de Complementariedad (de Bohr) y de Indeterminación (o Principio de Incertidumbre) de Heisenberg, que pueden enunciarse como:

---

<sup>115</sup> Recordemos que un fenómeno aleatorio (fortuito o al azar) es un fenómeno empírico que se caracteriza por la propiedad de que, al observarlo bajo determinado conjunto de condiciones, no siempre se obtiene el mismo resultado, es decir, no existe regularidad determinista, sino que los diferentes resultados ocurren con regularidad estadística; esto lleva a decir que existen números entre los valores 0 y 1 que representan la frecuencia relativa con la que se observan los diferentes resultados en una serie de repeticiones independientes del fenómeno. Decimos entonces que la probabilidad de que ocurra el evento A, denotada por  $P(A)$ , con A elemento de un espacio muestral  $\Omega$ , es un valor que se encuentra entre los valores 0 y 1. En términos probabilísticos, la certeza –o evento seguro– está dado por  $P(\Omega) = 1$ , mientras que el evento imposible está dado por  $P(A) = 0$ . Más aún, si se tiene una serie muy grande de pruebas, se observa que el evento favorable puede producirse con una frecuencia próxima a su probabilidad (*ley empírica del azar*); así que, un suceso cuya probabilidad no difiere de 1 sino en una cantidad extremadamente pequeña ( $\approx 10^{-100}$ ), puede considerarse, efectivamente, como humanamente cierto.

<sup>116</sup> Aquí no hay que perder de vista que las cuestiones estadísticas siempre son problemas de las probabilidades de las causas. En forma más clara, Borel arguye “...Es necesario decir algunas palabras acerca de la forma en que se plantean, con frecuencia, los problemas prácticos, siendo de la forma: “tal resultado, ¿se debió al azar o tuvo alguna causa? A esta pregunta, la teoría de probabilidades proporciona a menudo una respuesta que no habría que considerar como decisiva, pero que sería excesivo negarle todo valor”. (Borel, E. (1996); *Probabilidad y Errores*; Colección Metronómica, Serie Metrología Técnica, Limusa Noriega Ed.; México. p 98.

- Al querer asignar atributos físicos habituales a los objetos atómicos, como resulta evidente en el dilema planteado respecto a las propiedades corpusculares y ondulatorias de los electrones y fotones, nos enfrentamos con imágenes contrapuestas, cada una de las cuales se refiere a un aspecto esencial de la información empírica (de ellos obtenida).<sup>117</sup> (*Principio de Complementariedad*).
- No es posible determinar la fijación de dos variables conjugadas  $q$  y  $p$  de una partícula con precisión ilimitada, es decir,  $\Delta q \cdot \Delta p \approx h$  (*Principio de Incertidumbre*).<sup>118</sup>

Pareciera entonces que la mecánica cuántica fue el último clavo en el ataúd del determinismo, sobre todo con la preconización del Principio de Incertidumbre, ya que frecuentemente se ha considerado que éste es una prueba fehaciente del indeterminismo en el mundo físico.

Sin embargo, me parece que del Principio de Incertidumbre no es posible inferir un argumento contundente capaz de dejar inánime al determinismo, puesto que dicho principio se cimenta en la probabilidad de ocurrencia de los eventos; esta descripción probabilista surge, en primer lugar, por la respuesta inmediata que la teoría se obliga a dar de los resultados experimentales, y después, por las incapacidades tanto teórica e instrumental de dar fe de cómo son los objetos atómicos, puesto que desconocemos cómo son en realidad estas criaturas (atómicas). Ahora bien, es cierto que en este último aspecto el electromagnetismo se encuentra al mismo nivel, aunque también es cierto que el modelaje es distinto, pues mientras la teoría cuántica se enfoca a un individuo cuántico, el electromagnetismo maneja conjuntos de individuos y proporciona valores promedio del comportamiento del conjunto –algo así como querer dar un modelo del comportamiento de una sola persona y dar el comportamiento de un conjunto de personas; estadísticamente, creo que es más fácil modelar el segundo caso–. Buen ejemplo de esto que señalo es la definición de la corriente eléctrica (corriente de conducción) en términos

---

<sup>117</sup> Bohr, N. (1964); *Física atómica y conocimiento humano*; Aguilar, S. A. de Ediciones; España; p 49-50. Esto puede decir, de manera más simple, que los objetos no son ondas ni partículas, sino que asumen el papel de uno u otro objeto dependiendo de la observación que se lleve a cabo. Formalmente se enuncia: “*Los objetos en la naturaleza no son partículas ni son ondas; un experimento o medición que resalte una de estas propiedades, lo hace necesariamente a expensas de la otra. ... La descripción cuántica de las propiedades de un sistema físico se expresa en términos de parejas de variables mutuamente complementarias. La precisión en la determinación de una de estas variables, necesariamente implica una imprecisión en la determinación de la otra.*” (Saxon, D. S. (1968); *Elementary Quantum Mechanics*; Holden-Day, USA; pp 16-17).

<sup>118</sup> Las variables conjugadas de una partícula pueden ser, por ejemplo, la cantidad de movimiento  $\Delta p$  y la posición  $\Delta x$ , o la energía  $\Delta E$ , y el tiempo  $\Delta t$ . En todo caso, se cumple que  $\Delta q \Delta p \geq h/2\pi$ , siempre;  $h$  se denomina *constante universal de Planck* o “*cuanto de acción*”, donde  $h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .

de los valores promedio del desplazamiento del conjunto de portadores de carga a través del medio. Esa es la razón de que en el electromagnetismo obtengamos resultados concluyentes y modelos altamente explicativos, amén de que tenemos bien identificadas y separadas las imágenes clásicas de partícula y onda, por lo que el modelaje es más simple y más explícito; en cambio, y quizá por el momento, en la teoría cuántica no es posible saber qué tipo de ente es la criatura atómica. Ahora bien, digo que por el momento, porque esto podría modificarse con el paso del tiempo y con el avance de la ciencia y la tecnología.

Pero retomando el indeterminismo del principio de incertidumbre, y tal como mencioné líneas arriba, éste no asesta un golpe demoledor al determinismo, puesto que aún se fundamenta en aspectos probabilistas de ocurrencia, y estos hechos probabilistas no descartan la causalidad, aunque la debiliten; la probabilidad debilita el causalismo debido a que no se conocen satisfactoria y profundamente todos y cada uno de los factores que influyen en la aparición y marcha del suceso, es decir, la probabilidad –sea clásica o frecuencialista– muestra que existen ligeras variaciones en las condiciones de ocurrencia de los eventos, condiciones que pudieran llegar a ser, inclusive, completamente aleatorias –por ejemplo, las condiciones iniciales–, y de ahí la disparidad en los resultados obtenidos. En este sentido, considero, se orienta el principio de incertidumbre, que está asociado directamente con la imposibilidad de medir simultáneamente las variables (cinéticas y cinemáticas) requeridas para dar una descripción clásica, tal y como lo exigiría el determinismo laplaciano. Pero esto en sí mismo no me parece que sea un elemento de verdadero peso como para descartar la causalidad del medio natural, puesto que siguen estando presentes las regularidades en el comportamiento de los sistemas, y desde mi punto de vista, las regularidades implican ideas causalistas.

En consecuencia, la teoría cuántica, al hallarse imposibilitada de dar una certeza conceptual relativa a la naturaleza física de las entidades atómicas, introduce el indeterminismo no sólo en el principio de incertidumbre, sino en sus mismos postulados, por lo que naturalmente se ve obligada a defender el indeterminismo. Es de esto de lo que se quejaban Einstein y otros más. Además, el principio introduce al observador como un factor de considerable peso que, por el simple hecho de ser un espectador, introduce cambios incuantificables en la evolución del sistema. Sin embargo, este argumento se puede repensar porque, en primera instancia, subyace la impresión de que si el observador es quien introduce los cambios que vuelven indeterminista al sistema, bastaría

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

con sustraer la presencia del observador para que el sistema cuántico ¡fuese determinista! Con ello, y al menos discursivamente, se patentiza que el principio de incertidumbre no atenta contra el determinismo en tanto no queramos conocer el comportamiento de los objetos atómicos, sino que, y como consecuencia de gran magnitud, resulta que es el espectador de la evolución del evento quien introduce fluctuaciones imponderables en el sistema, es decir, es el observador el origen del indeterminismo cuántico, pues allí, dada la magnitud de las criaturas atómicas, puede ocasionar grandes perturbaciones, cosa que no ocurre en el mundo macroscópico.

En suma, pienso que aun cuando se admita generalmente que la teoría cuántica es indeterminista, podría no ser enteramente válida tal suposición, puesto que el indeterminismo mecanocuántico sería una consecuencia derivada de comparar sus resultados y predicciones –así sean probabilistas– con los resultados y predicciones que emanan de la física clásica. Y es que, la teoría cuántica es, en sí misma, una teoría determinista. Prueba de ello es que no puede ignorar la secuencialidad, tanto en espacio como en tiempo, de los eventos; y más aún, de manera necesaria acude a su propia normatividad para predecir dónde es posible hallar al objeto cuántico. Quizá lo que realmente ha debilitado la teoría cuántica es la relación causal, aunque me parece que esto se debe más al desconocimiento del micromundo, que por convicción. Sin embargo, la debilidad del causalismo no necesariamente implica ausencia de éste. Dicho de otro modo: que el Principio de Incertidumbre de Heisenberg no acepte que el mundo sea determinista, tampoco puede probar enteramente que sea indeterminista, puesto que dicho principio se asocia a los errores propios de la medición, recalcando la imposibilidad instrumental (y en consecuencia, observacional) de cuantificar simultáneamente las variables dinámicas y cinemáticas requeridas clásicamente para describir unívocamente el comportamiento de una criatura atómica.

## **1.5 Exponentes principales del indeterminismo**

Brevemente, dentro de las personalidades que apoyan el indeterminismo, sobresalen Bohr, Heisenberg, Pauli, Born, Hume y Popper. Quitando a los dos últimos (filósofos), los demás son físicos que se dedicaron a la mecánica cuántica. Falta ubicar a de Broglie y a Schrödinger, que al inicio fueron, si se le puede llamar así, adherentes a la declaración de

Copenhague para optar después por buscar una explicación determinista del acontecer subatómico.

De entre los que apoyan, o apoyaron, el determinismo científico, se encuentran los griegos, Descartes, Galileo, Kepler, Newton, Laplace y Einstein (con su famosa frase de “Dios no juega a los dados”), y parece ser que recientemente, Bohm y Hawking. Habrá que ver si hay alguien más. Son los personajes más reputados hasta este momento. Sin embargo, parece ser que cada día hay quienes se agregan a un bando o al otro. Así que, en cuestiones del determinismo o el indeterminismo, nada está dicho, y la polémica continúa.

## **1.6 Conclusiones**

Como se ha visto a lo largo de este capítulo, desde que el ser humano comenzó a observar con mayor detenimiento su entorno, ha buscado dar una explicación del acontecer de las cosas. Para ello, ha recurrido a los dioses o a principios básicos que expliquen el por qué de los sucesos. Más aún, el desarrollo de la filosofía, y posteriormente de la física, posibilitó una impresión de que el funcionamiento de la naturaleza es equivalente al de un mecanismo, obligándola a admitir una relación de causa-efecto. Esta idea ensalzó algunos modelos exitosos debido a su elevada precisión en la predicción de los acontecimientos. Tal tipo de explicación ha recibido el mote de determinista, y se ha dividido en las modalidades: religiosa, metafísica y científica.

Sin embargo, al encontrar un fenómeno que sale de la potestad de la teoría explicativa, ha hecho dudar a varios pensadores y científicos si el determinismo vale o no, lo que ha llevado el pensamiento hacia el otro extremo, es decir, hacia el indeterminismo.

Una gran controversia entre los apologistas de una u otra doctrina se ha levantado. Por la filosofía descuellan, sin duda alguna, los indeterministas Hume y Popper, quienes con su capacidad intelectual y agudo ingenio han cuestionado fuertemente las tesis deterministas.

Pero no sólo están los cuestionamientos filosóficos, sobre todo los asociados con la libertad del hombre. En la ciencia también se han suscitados tales polémicas, teniéndose de un lado dos grandes contendientes que parecen dar la razón al determinismo científico: la mecánica clásica y la teoría de la relatividad. Del otro lado, está la mecánica

cuántica, un rival de gran fortaleza conceptual que parece inclinarse por el indeterminismo.

Los argumentos de ambos bandos son sólidos, y hay que analizarlos concienzudamente para llegar a determinar con mayor claridad si el determinismo en la mecánica cuántica, sobre todo en lo relativo al principio de incertidumbre, es válido o no. Para ello, hay que desenmarañar la madeja de argumentos deterministas e indeterministas relacionados con él, porque ambos rivales cuentan con grandes logros que presumir y argumentos de mucho peso, a favor o en contra.

La moneda pues, está en el aire.



## Capítulo 2

### El indeterminismo y la física

#### Introducción

En este capítulo se hace una revisión más exhaustiva de lo que es el indeterminismo y su relación con la física, desglosando por qué la física clásica se considera determinista y por qué la mecánica cuántica no. Aquí se hace un brevísimo resumen de las críticas de Popper a la mecánica cuántica, puesto que tales opiniones en contra de la teoría se encuentran en varios volúmenes de su autoría. Popper lanza un sinfín de dardos hacia la física cuántica, a la que continuamente llama indeterminista, pero ¿por qué es indeterminista? ¿Bajo qué supuestos lo es? Creo que por el sólo hecho de que un campo de conocimiento maneje la probabilidad y la estadística no se le puede llamar indeterminista; así que para ver por qué es indeterminista, me veo obligado a hacer un estudio de por qué la física clásica es determinista, buscando con ello una contrastación entre la teoría clásica y la teoría cuántica. Eso deberá conducirnos a evaluar con mayor detenimiento el Principio de Incertidumbre de Heisenberg, y hurgar en sus entrañas a qué tipo de indeterminismo alude.

#### 2.1 Objeciones de Popper al indeterminismo de la mecánica cuántica

En las postrimerías del siglo XIX aparecieron varios experimentos relacionados con el mundo atómico que llamaron la atención de los científicos, quienes rápidamente se abocaron a solucionarlos y a encontrarles explicación mediante la conceptualización de la física clásica; sin embargo, fracasaron en su intento, por lo que la física se sumió en una profunda crisis al ser incapaz de superar el reto que los nuevos experimentos le planteaban. Fue tal el agobio que experimentó la teoría clásica que hubo de admitir que el andamiaje teórico con que se contaba en ese entonces era insuficiente para dar una explicación satisfactoria de los eventos experimentales bajo estudio.

Pero la mecánica cuántica –inicialmente la antigua, a la que posteriormente se integró la mecánica ondulatoria para conformar un único campo de estudio bajo la denominación de mecánica cuántica moderna o mecánica cuántica–, vino a solucionar con resonante éxito los problemas surgidos de la experimentación que no encontraron respuesta satisfactoria por parte de la física clásica. Una vez alcanzado el reconocimiento de la comunidad científica, la mecánica cuántica se dio a la tarea de estructurar lógicamente los conceptos e ideas que incesantemente emanaban de su seno y para ello, los ‘axiomatiza’, enunciándolos en lo que hoy recibe el nombre de Postulados de la Mecánica Cuántica;<sup>1</sup> esta ‘axiomatización’ derivó hacia una conceptualización más organizada y definida que permitió a la teoría desarrollarse de manera sostenida y mantener la coherencia interna de tal suerte que, hasta la fecha, la física cuántica continúa siendo uno de los mayores logros teórico-predictivo alcanzado por el ser humano.

Así, solucionar los problemas aplicando las nuevas ideas sirvió como un revulsivo al interior de la física, a la vez que suscitó un acalorado debate, no sólo por la significancia de los conceptos cuánticos, sino también por su trascendencia epistemológica. Sobra decir que tal discusión no pasó desapercibida para muchos filósofos, quienes volvieron su atención hacia las implicaciones de los preceptos de la naciente teoría.

Uno de los filósofos que vertieron más críticas –muchas de ellas acerbas–sobre la mecánica cuántica fue Popper, filósofo autodenominado realista que “pone en tela de juicio algunos de los supuestos más fundamentales de la investigación actual de la física”,<sup>2</sup> al considerar que: “la física está en crisis”, y dicha “crisis se debe, esencialmente, a dos cosas: a) la intrusión del subjetivismo en la física, y b) la victoria de la idea de que la teoría cuántica ha alcanzado la verdad total y final”.<sup>3</sup>

Popper no se circunscribe a cuestionar las tesis fundamentales de la mecánica cuántica y sus consecuentes conflictos epistémicos, sino que busca restituir la objetividad de la física clásica y pretende enmendar la supuesta completud de la teoría, porque para él ninguna teoría es completa, dado que ésta (la teoría) sólo es una herramienta que nos permite acercarnos a la realidad. Para lograr su cometido, Popper critica el Principio de Incertidumbre de Heisenberg y la interpretación subjetivista de la probabilidad inmersa en la teoría, por lo que se aventura a proponer una probabilidad objetiva a la que denomina

---

<sup>1</sup> Estos postulados se enuncian en el capítulo siguiente.

<sup>2</sup> Popper, K. R. (1956): *Teoría cuántica y el cisma en física. Post Scriptum a La lógica de investigación científica, Vol. III*; Ed. Tecnos; Madrid, 1996. p. 13.

<sup>3</sup> *Ibid.*, p. 25.

“probabilidad propensivista”, pretendiendo con ello “dar un esquema del modo en que la interpretación propensivista resuelve las diversas paradojas de la teoría cuántica”,<sup>4</sup> y buscando además “clarificar la situación y [...] mostrar que debemos devolver a la discusión racional”<sup>5</sup> las controversias que han generado desde entonces las diversas interpretaciones dadas a la teoría. El filósofo arguye que no desea vulnerar la mecánica cuántica, sino que sólo pretende hacer más simple la comprensión de los conceptos cuánticos, y para lograrlo, considera deben replantearse –como requisito esencial para retornar al sendero de la objetividad– la idea de la “«reducción del paquete de ondas»” y la interpretación de las «relaciones de indeterminación» de Heisenberg.

Sucintamente podríamos resumir los dos grandes ejes en torno a los que el filósofo articuló sus objeciones que, tal y como él dice, son:

1) La intrusión del subjetivismo en la física. Popper hace señalamientos respecto de que la aparición del subjetivismo se debe, principalmente, al Principio del Incertidumbre, a la par que aduce que la intrusión de dicha interpretación es un claro desafío al objetivismo histórico subyacente en la física clásica, puesto que “si se interpretan (directamente) las fórmulas de Heisenberg en un sentido subjetivo, se pone en peligro la posición de la física como ciencia objetiva”.<sup>6</sup> El filósofo asegura que la mecánica cuántica, aun cuando introduce conceptos estadístico-probabilistas “es tan objetiva como pueda serlo cualquier teoría”,<sup>7</sup> debiendo ser (tan objetiva) como la mecánica estadística. Además, el sujeto no puede (o no debería) afectar con sus observaciones la evolución de un evento, puesto que en su interacción con éste (el evento) debe circunscribirse a ser un simple espectador cuyo principal objetivo debe ser la contrastación de la teoría.

2) La completud de la teoría. Popper se opone a la completitud que pregonan los sustentantes de la declaración de Copenhague, y lo hace argumentando que ninguna ciencia, y mucho menos la física, puede jactarse de haber llegado a su estado final, bien sea en su desarrollo teórico o en el conocimiento de la realidad que ha adquirido; por ello, el filósofo se empeña vigorosamente en señalar lo contrario, al decir que la teoría cuántica no es completa y que además arrastra, no obstante haber alcanzado su madurez, el grave problema de comprensión que subyace en sus conceptos e ideas, no importando cuán (operativamente) exitosa sea; enfáticamente lo señala, al decir que

---

<sup>4</sup> *Ibid.*, p. 161.

<sup>5</sup> *Ibid.*, p. 173.

<sup>6</sup> Popper, K. R. (1982): *La lógica de la investigación científica*; Editorial Tecnos. España. p. 217.

<sup>7</sup> Popper., *Teoría cuántica y el cisma en...* p. 138.

La teoría física tiene un éxito increíble; produce constantemente nuevos problemas y resuelve tanto los viejos como los nuevos. Y parte de la crisis actual –la casi permanente revolución de sus teorías fundamentales– es, en mi opinión, el estado normal de cualquier ciencia madura. Pero la crisis actual tiene otro aspecto: es también una crisis de comprensión. Esta crisis de nuestra comprensión es aproximadamente tan antigua como la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica. [...] En mi opinión, la crisis se debe, especialmente, a dos cosas: a) la intrusión del subjetivismo en la física, y b) la victoria de la idea de que la teoría cuántica ha alcanzado la verdad total y final.<sup>8</sup>

De hecho, su insistente reclamo por la supuesta completud de la mecánica cuántica termina por volverse una condena monocorde, lo que le lleva incluso a asegurar que los apologistas de la teoría cuántica han conformado un (supuesto) grupo de físicos apegado a la ortodoxia cuántica que acepta dogmática y ciegamente las propuestas de aquéllos que lideran la declaración de Copenhague y que, asegura, ignora las opiniones del grupo disidente encabezado por Einstein, el más vehemente y férreo opositor de la completud de la teoría, que también considera que una teoría siempre puede ser modificada para explicar mejor la realidad,<sup>9</sup> y se niega a aceptar que la teoría deba ser vista sólo como un instrumento para observar el acontecer natural; sin embargo, y a pesar de todo, Einstein admite la teoría cuántica como la “formulación óptima del estado de cosas”, aunque cree que “esta teoría no brinda un punto de partida útil para la futura evolución”.<sup>10</sup> Popper afirma que el grupo dominante, conformado por “algunos físicos inflexibles de la generación actual”<sup>11</sup> se rehúsa a analizar críticamente los conceptos fundamentales que vertebran la física cuántica, pareciendo “no tener interés por tales discusiones, o, si lo tienen, se las dejan a Niels Bohr, estando interesados solamente en construir 1) *un formalismo*, y 2) *su aplicación*; y nada más.”<sup>12</sup> Más ácidamente se expresa de Heisenberg, pues opina que “fue él quien indujo a una generación de físicos a aceptar la absurda

<sup>8</sup> Popper: *Teoría cuántica y el cisma en...* p. 25.

<sup>9</sup> Hasta este momento he utilizado el término ‘explicar’ en el entendido de que dicho vocablo es claro y evidente en sí mismo y nos lleva a buscar, mediante procesos lógico-deductivos, el conjunto de conclusiones que nos permitirán llegar hasta los principios más pequeños, fundamentales e irreducibles, que hay en la naturaleza. Intentar alcanzar mediante razonamientos y deducciones las relaciones entre tales conceptos posibilitará, suponemos, penetrar en la estructura natural para comprender y justificar el porqué de las cosas. Claramente, el problema radica aquí en dónde comenzamos con los procesos deductivos, pues partimos de experiencias sensibles; además, es palpable que muchos de los reductos últimos en la naturaleza pueden ser de carácter metafísico. No obstante, la ‘explicación’ sienta las bases para ‘operar con la naturaleza’, haciéndola entendible, construible y predecible. Dicho de otra manera, la explicación la entiendo como el establecimiento de unos pocos principios, lo más simple y claros posibles, que sirvan de punto de partida (los cimientos) para lo que vendrá después. Algo así tenemos en la matemática, con sus axiomas; y es lo que pretendemos hacer en física, con sus postulados.

<sup>10</sup> Einstein, A.: *Notas autobiográficas*; Alianza Editorial. Madrid, 1979. p. 81.

<sup>11</sup> Popper., *Teoría cuántica y el cisma en...* p. 122.

<sup>12</sup> *Ibid.*, 122.

concepción de que de la mecánica cuántica se aprende que «la realidad objetiva se ha esfumado».<sup>13</sup>

Popper también advierte de la intrusión de un indeterminismo tan fuerte como el que se manifiesta en la mecánica cuántica, y si antes objetó el determinismo imperante en la física clásica –sobre todo el determinismo laplaciano–, ahora critica el indeterminismo explícito de la teoría cuántica; para él, esta clase de indeterminismo tiene su origen en la interpretación subjetiva de la probabilidad que subyace en la teoría, por lo que propone que tal interpretación debe sustituirse por una interpretación objetiva, que no será más que su interpretación propensivista de la probabilidad; así, Popper declara que

... Aunque estoy profundamente enamorado de las ondas (mucho más que de las partículas), creo, no obstante, que la teoría cuántica es, en un sentido muy claro, una teoría de partículas (en esto, no estoy de acuerdo con Schrödinger) y que lo es en un sentido que excluye la dualidad o la analogía o la complementariedad entre partículas y ondas. Seré más explícito: creo que las ondas (incluso de la segunda cuantización) son representaciones matemáticas de las propensiones, o de las propiedades disposicionales de la situación física (tal como la situación experimental), que pueden interpretarse como propensiones de las partículas a adoptar ciertos estados. En la medida en que la teoría cuántica es una teoría probabilística, es una teoría de ondas o de matrices. Por ello, la teoría de ondas y la teoría de matrices son equivalentes. Pero las probabilidades que la teoría determina siempre son las propensiones de las partículas a adoptar cierto estado bajo ciertas condiciones.<sup>14</sup>

Como se ve, es por demás evidente que para el filósofo la probabilidad propensivista es la única interpretación que resolverá las paradojas cuánticas, al considerar que tal probabilidad es una “realidad física”<sup>15</sup> en tanto que atributo del sistema experimental, más que de los elementos que lo conforman; es decir, la propensitividad se constituiría, de alguna manera, en una propiedad estructural de la situación física por lo que, en caso de que el sistema sufra una modificación, indudablemente que esta propiedad se manifestará nítidamente en el agrupamiento estadístico que asuman los datos experimentales. Con esto, el filósofo advierte que el azar en la teoría cuántica es un elemento propio de la naturaleza subatómica que se manifestará como otra variable del arreglo experimental, y si se lo considera como tal, permitiría eliminar el uso de variables ocultas y solucionar el problema del azar epistémico; es decir, que el azar, por ser un elemento natural, es netamente ontológico, y en consecuencia, es objetivo.

Sin embargo, si bien son interesantes las disquisiciones de Popper respecto al azar, la probabilidad y la estadística en la teoría cuántica, da la impresión de que (Popper) finca

---

<sup>13</sup> *Ibid.*, p. 32.

<sup>14</sup> *Ibid.*, pp. 144-145.

<sup>15</sup> Popper., *Un mundo de...* p. 30, último párrafo.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

sus argumentos probabilistas y estadísticos contra la teoría cuántica en la inducción, pues presupone el comportamiento característico de una partícula como semejante al que adquiere un conjunto de partículas, y en ello basa sus argumentos probabilistas; es decir, utiliza elementos parecidos a los que censura.

Ahora bien, la probabilidad dentro de la teoría cuántica se explica por medio de una función de densidad probabilista, dada por la magnitud de la función de onda al cuadrado, y asigna probabilidades individuales para encontrar en alguna región del espacio a cada partícula, no a un conjunto de partículas. Si bien esto ha emanado de estudios estadísticos previos con conjuntos de partículas, el modelo se ha enfocado a la localización de una sola, es decir, son probabilidades de eventos que tienden a la singularización. Es por eso que aseguramos que la probabilidad dentro de la teoría cuántica se ha constituido en una herramienta sumamente poderosa que está orientada a predecir dónde se encontrará una y sólo una partícula en un instante dado, siendo este caso equivalente a decir que se busca cuantificar en qué tirada de un dado caerá un 6, por ejemplo. Aquí vemos que ya la probabilidad no es tan clásica,<sup>16</sup> sino que más bien es una especie de “medida ponderada” que determina dónde es más factible que se halle la partícula.

Es esta interpretación de la probabilidad motivo de discusión entre los físicos, puesto que los suscriptores de la declaración de Copenhague aducen una postura subjetivista, mientras que Einstein, Schrödinger y de Broglie<sup>17</sup> lo hacen clásicamente, es decir, apoyan la postura objetiva. Y en el mismo talante se encuentra la estadística, que además de emplearse para determinar los errores experimentales y la disposición que guardan los datos recolectados, es la herramienta que permite determinar la superposición de los estados individuales que asumen los objetos atómicos. Pero Popper atribuye a los físicos errores en la interpretación estadística, arguyendo que es eso lo que los conduce, irremediablemente, a un subjetivismo dominante en la teoría, cosa que no ocurriría de usar una probabilidad objetiva como la propensivista.

---

<sup>16</sup> Que no es más que el número de éxitos entre el número total de observaciones. A esta probabilidad también se la denomina probabilidad *apriorística*, porque antes de realizar el experimento se conoce de antemano la probabilidad de ocurrencia del evento. Es una probabilidad objetiva. Igualmente, la probabilidad frecuencionalista también es una probabilidad objetiva y suele llamársele probabilidad *a posteriori*, y es el número de veces de la ocurrencia del evento entre el total de repeticiones del experimento. La probabilidad subjetiva, en cambio, es aquella que depende de la experiencia del experimentador y que asigna probabilidades de acuerdo al conocimiento que éste tenga de la ocurrencia del evento, de tal manera que varía de un experimentador a otro.

<sup>17</sup> *Cfr.* Capítulo 3.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Lacónicamente, Popper expresa su malestar cuando asegura que los físicos dan explicaciones que, sin ser falaces, podrían ser explicadas más veraz y satisfactoriamente si se abandonara la interpretación probabilista subjetiva imperante en el estudio de los fenómenos atómicos, al manifestar que

El frecuente uso de expresiones que poseen cierto matiz psicológico –tales como «*esperanza matemática*», «*ley normal de errores*», por ejemplo, etc.– sugiere una *interpretación subjetiva* de la teoría de la probabilidad, que en su forma original es más bien *psicologista*; trata el grado de probabilidad como si fuese una medida de los sentimientos de la certidumbre o incertidumbre, de creencia o de duda, que pueden surgir en nosotros ante ciertas aserciones o conjeturas. Cuando lo que nos ocupa son ciertos enunciados no numéricos, la palabra «probable» puede traducirse satisfactoriamente de este modo; pero no me parece muy apropiada una interpretación de los enunciados probabilísticos numéricos que se encamine en esta dirección.

[...] La *interpretación objetiva*, considera que todo enunciado probabilístico numérico enuncia algo acerca de la *frecuencia relativa* con que acontece un evento de cierto tipo dentro de una sucesión de acontecimientos. [...] De acuerdo con esta tesis, los enunciados probabilísticos numéricos sólo son admisibles en el caso en que se les pueda dar una *interpretación frecuencial*.

[...] Así pues, declaro mi fe en una interpretación objetiva, debida principalmente a que creo que sólo una teoría objetiva puede explicar la aplicación del cálculo de probabilidades en la ciencia empírica. Admito abiertamente que la teoría subjetiva es capaz de dar una solución coherente al problema de cómo decidir los enunciados probabilísticos, y que –en general– tropieza con menos dificultades lógicas que la teoría objetiva; pero su solución es que los enunciados probabilísticos son no empíricos, son tautologías, y de ahí que sea enteramente inaceptable cuando recordamos cómo se utiliza la teoría de probabilidades por la física.<sup>18</sup>

Asimismo, el filósofo considera que la mecánica cuántica –pese a sus espectaculares logros– se ha visto entorpecida y obstaculizada por sus propios esquemas teóricos, y principalmente por su interpretación probabilista; son tales esquemas, juzga Popper, los que han impedido que la física cuántica encuentre las relaciones que caractericen objetivamente los sucesos del mundo atómico, al pasar por alto los atributos físicos (o propensiones, como él les denomina) de los sistemas que inducirían, de manera natural, los estados (cuánticos) que podrían adquirir los elementos de la población bajo estudio, tal y como lo propone en su interpretación propensivista. Y es que él opina que buena parte del andamiaje teórico cuántico es el causante de que la teoría no explique satisfactoriamente muchos experimentos atómicos, viéndose entonces impelida a proponer una aberración conceptual inadmisibles desde cualquier punto de vista: la dualidad onda-partícula; de hecho, Popper asegura que

[...]Creo, no obstante, que la teoría cuántica es, en un sentido muy claro, una teoría de partículas (en esto, no estoy de acuerdo con Schrödinger) y que lo es en un sentido que excluye la dualidad o la

---

<sup>18</sup> Popper., *La lógica de la investigación...* pp. 139-140.

analogía o la complementariedad entre partículas y ondas. Seré más explícito: creo que las ondas (incluso las de la segunda cuantización) son representaciones matemáticas de las propensiones, o de las propiedades disposicionales de la situación física (tal como la situación experimental), que pueden interpretarse como propensiones de las partículas a adoptar ciertos estados. En la medida en que la teoría cuántica es una teoría probabilística, es una teoría de ondas o de matrices [...] No hay, pues, simetría ni dualidad entre ondas y partículas.<sup>19</sup>

Popper asegura que su teoría propensivista es capaz de solucionar el problema epistémico de la dualidad corpúsculo-onda asignado por la teoría cuántica a las entidades atómicas, salvando con ello el escollo que representa el indeterminismo cuántico y retornando la objetividad a la física. Es indudable, para él, que el cisma entre las físicas clásica y cuántica es más que evidente, pues mientras aquella mantiene como pendón la relación causa-efecto, ésta privilegia el indeterminismo; y lo mismo ocurre con el realismo y la objetividad de la teoría clásica, en franca oposición con el instrumentalismo y subjetivismo de Bohr y Heisenberg. Popper, sumariamente expresa que

Tres cuestiones fundamentales han llevado al cisma:

1. Indeterminismo versus determinismo.
2. Realismo versus instrumentalismo.
3. Objetivismo versus subjetivismo.<sup>20</sup>

## 2.2 La Relación Causal

Después de los impecables argumentos de Hume y Popper, entre otros, acerca de la inviabilidad natural del determinismo, concedamos, en primera instancia y a nivel macroscópico, que éste no existe, aunque creo que si comenzamos por suponer que en el mundo no existe una relación causa-efecto, sería bastante más difícil explicar el acontecer de los sucesos, por lo complicado de dar un argumento satisfactorio acerca del por qué se presentan las regularidades estadísticas en la naturaleza. El argumento escéptico humeano no nada más derrumba la tesis de una creación divina donde todo estaba diseñado con antelación; también pone en tela de juicio la causalidad que aparentemente subyace en el medio natural, demostrando lógicamente, con deducciones inobjectables, que desconocemos el por qué de los procesos y sus causas. Así, dado que sabemos tan poco cuáles son las causas verdaderas del acontecer natural, sólo podemos aventurar hipótesis que tiendan a dar una descripción de los sucesos, quedando de manifiesto que

---

<sup>19</sup> Popper: *Teoría cuántica y el cisma en...* p. 145.

<sup>20</sup> *Ibid.*, p. 189.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

las leyes naturales, al menos a nivel macroscópico, no son más que regularidades estadísticas; y enfatizo en que los argumentos de Hume valen para un mundo macroscópico porque a nivel microscópico, aun teniendo presente la tesis probabilista de la mecánica cuántica, no hay nada escrito acerca de si el mundo es determinista o no, porque no conocemos con certeza la naturaleza de los individuos atómicos, aunque parezca que prevalece el indeterminismo.

Verdad es que hasta el momento no es posible asegurar si en la naturaleza existe o no el determinismo puesto que no existe una explicación enteramente satisfactoria y contundente que dé cuenta de ello, bien sea favor o en contra; sin embargo, y en el caso de las ciencias, aceptamos el determinismo como un recurso científico que hace viable la construcción de modelos explicativos que permiten describir, y a veces comprender, el acontecer del mundo. Es así que para entender cómo es que una partícula subatómica posee determinada carga eléctrica –digamos por ejemplo, el electrón y su carga–, fue necesario introducir nuevas partículas –o sub-partículas, como los quarks– con la finalidad de dar una explicación más verosímil y amplia de su comportamiento en el medio natural. Es decir, de una u otra manera, seguimos aventurando hipótesis metodológicas que nos conduzcan a un mundo determinista, y el mundo atómico –aun con sus explicaciones probabilísticas– no es la excepción. Esto es lo que nos permite seguir pensando en la posibilidad de que exista, en el universo subatómico, una relación causal que hoy día desconocemos, dado que estamos impedidos de acceder a tal mundo pues los problemas científicos y técnicos que hacen posible el ingreso al micromundo suelen ser cada vez de más complejos y difíciles de solucionar, lo que nos induce a seguir proponiendo ideas que expliquen el comportamiento de las partículas atómicas aunque, a final de cuentas, tendamos a convertirnos –lo mismo que Bohr y su instrumentalismo declarado– en cronistas de los acontecimientos, pues ignoramos si dichas entidades, cada vez más y más pequeñas, tienen existencia real o sólo son conceptos que surgen de una necesidad teórica.

Por otra parte, si bien el indeterminismo en la naturaleza parece ser evidente, aun así es más conveniente suponer, siguiendo el camino de la sencillez teórico-conceptual, una naturaleza donde vale la relación causa-efecto y donde existen las contingencias, que admitir una naturaleza puramente contingente que no pueda dar una explicación convincente del por qué ésta se manifiesta proclive a una relación causal tan fuerte como la que implican las regularidades estadísticas. Así pues, para explicar por qué ocurren

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

dichas regularidades en una naturaleza completamente aleatoria, tenemos la opción de considerar que las regularidades implican una preferencia de la naturaleza por “caer” continuamente en valores semejantes, es decir, un dado cargado que es partidario de adoptar ciertos valores en mayor cantidad que otros, lo que nos lleva a considerar que existen estados de energía básicos o preferentes en el medio natural, y eso se relaciona con la estabilidad y el equilibrio de un sistema. Y es que en efecto, bajo casi cualquier tenor es más complicado explicar por qué una naturaleza totalmente contingente puede generar la misma contingencia repetidamente (con una probabilidad de ocurrencia grande) que admitir que existe una relación causal donde existen los accidentes. Quizá en el inicio de los tiempos, y teniendo presente la teoría del big-bang, en el instante de la explosión sólo hubiese caos, pero en un instante posterior a la explosión (tal vez en el tiempo Planck,  $t_p = 1.35 \times 10^{-35}$  s), y conforme el universo comenzó su expansión, la materia debió comenzar a aglutinarse, en intervalos temporales muy pequeños, pero mayores que  $t_p$ , haciéndolo más y más frecuentemente debido a las (quizá) incipientes fuerzas gravitacionales, lo que le permitió “organizarse” en estructuras atómicas cada vez más complejas –por ejemplo, un átomo de Hidrógeno y quizá, de Helio–; si tal fuese el caso, estaríamos hablando de sistemas que alcanzaron una etapa de cuasiestabilidad prontamente. Ahora bien, dado que la expansión prosiguió, entonces sí pudo existir agrupamiento de partículas atómicas para constituirse en átomos de número atómico pequeño, pero a fin de cuentas, sistemas de partículas dinámicamente estables, sistemas que alcanzaron mínimos funcionales equivalentes a los que maneja el principio de la variación estacionaria (o principio de mínima acción); es decir, de una u otra manera se alcanzó cierto equilibrio de fuerzas, dando lugar a una relación causal en embrión que debió afirmarse cada vez más con el transcurso del tiempo, tal y como ocurre habitualmente con el equilibrio de los sistemas físicos, equilibrio que está claramente explicado por el principio variacional estacionario.<sup>21</sup>

Nos enfrentamos entonces a dos posturas que buscan explicar el funcionamiento de la naturaleza: la postura determinista y la indeterminista, ambas con sus ventajas y desventajas, y donde ambas doctrinas dan sólidos argumentos para probar la existencia o

---

<sup>21</sup> El Principio Variacional, también conocido como Principio de la Variación Estacionaria o Principio de Mínima Acción de Hamilton proporciona los valores extremos de las funcionales que son solución de las ecuaciones del movimiento de Newton en un sistema potencial. Se enuncia frecuentemente en un teorema que muestra que en muchos casos, la acción  $q(t) = (q_1, \dots, q_{3n})(t)$  no es sólo un valor extremo sino también un valor mínimo de la acción funcional  $\int L dt$ , donde  $L = T - U$  es el lagrangiano del sistema, con  $T$  = energía cinética y  $U$  = energía potencial.

inexistencia de la relación causal en el medio natural; la postura determinista es la más utilizada en la ciencia e incluso, en la vida cotidiana, aun cuando la relación causal se admita más como una condicionante que impone una necesidad lógica del tipo “si ocurre esto *entonces* ocurre aquello”. Es decir, la relación causal propende a ser una especie de imperativo lógico para dar explicaciones racionales a la evolución de los eventos; no obstante, para el autor ambas posturas –determinista e indeterminista– prohíben el uso del causalismo al anidar la relación causal en su estructura en mayor o menor medida y con distinto grado de fortaleza: la relación es más fuerte en la postura determinista y más débil en la indeterminista. En el caso del indeterminismo, por ejemplo, cuando asegura que en la naturaleza sólo existen regularidades estadísticas, inevitablemente aparece implícita la causalidad en la regularidad misma, pues de lo contrario, sería muy difícil sostener las regularidades en un mundo totalmente azaroso. Quizá lo que motivó a Newton a matematizar la naturaleza fue el haberse percatado de que hay regularidades (estadísticas) presentes hasta en el movimiento de los astros, y esto le llevó a emplear la inducción para introducir la relación causal como principio explicativo y hacer que fuese el bastión de la física para, con ello, simplificar la comprensión y modelación de las regularidades naturales, regularidades que ahora admitimos son las leyes naturales.

Pareciera entonces que tanto el determinismo como el indeterminismo aluden (este último, veladamente) al equilibrio de los sistemas físicos. Reconocemos también que la postura determinista fue enunciada de una manera sumamente rígida por Laplace,<sup>22</sup> al considerar necesaria y explícitamente al tiempo como una variable fundamental e indispensable para el análisis de un sistema dado, por considerar que el tiempo es uno de los parámetros espacio-temporales más fácilmente aprehensible. Caso contrario ocurre con la postura indeterminista quien utiliza al tiempo, quizá como una variable secundaria, por considerar que la naturaleza es, en sí misma, azarosa y por tanto, el tiempo pierde, aparentemente, relevancia en la descripción del evento; sin embargo, tengo la impresión de que la postura indeterminista pasa por alto que maneja, en forma implícita, la monotonía del fluir temporal y la secuencialidad de los procesos, cosa que automáticamente la vuelve, según la relatividad, en determinista. Por ello es que pienso que lo que debe explorarse más detenidamente no es el determinismo en sí, si no quien le respalda, es decir, la relación causal; por mi parte, y por cuestiones de economía, me parece más adecuado admitir una naturaleza causalista en la que existen los accidentes,

---

<sup>22</sup> Cfr. Capítulo 1.

que el caso inverso; esto debido a que es más viable y plausible recurrir a inestabilidades súbitas de los sistemas que rompan con la habitual relación causal y den origen a las contingencias, que acudir a un universo no causal y desequilibrado al que le llevaría mucho más tiempo alcanzar un (posible) equilibrio que dé lugar a las regularidades estadísticas. Y es que tales inestabilidades (o estabilidades) deben surgir, creo que necesariamente, por la interacción que presenta el sistema con su entorno, el cual le afecta de uno u otro modo. Un sistema aislado que estuviese en equilibrio interno difícilmente modificaría por sí mismo un estado de equilibrio, viéndose obligado a continuar así hasta que un agente externo le modifique, sacándolo de su estado de equilibrio; sin embargo, sabemos que no hay sistemas totalmente aislados –quizá, y extrapolando, únicamente el universo– por lo que siempre hay un intercambio de acciones entre el entorno y el sistema. Inclusive, cotidianamente tenemos a simple vista sistemas físicos que no están aislados y que presentan una interacción continua con su medio ambiente y, aún así, son capaces de mantener por mucho tiempo su configuración estable “actual”; un ejemplo de estos casos puede ser, a nivel humano, una construcción arquitectónica que dura muchos siglos sin modificar sustancialmente su forma ni su estabilidad –las pirámides de Egipto son un excelente ejemplo–.

Las inestabilidades súbitas de un sistema serían ocasionadas por la acción de un agente externo o por la conjunción de muchos agentes que actúan sobre él y, además, por la concurrencia de varias circunstancias favorables que propician la afección del sistema, o incluso, por modificaciones estructurales internas (que sobrevienen con retraso después de la interacción del sistema con su entorno); quizá sea por esto último por lo que tenemos la impresión de que el sistema es capaz de modificarse *per se*; aunque lo que en verdad pudo haber ocurrido es que hubo una pequeña inestabilidad en alguna parte de su interior y ésta comienza a propagarse a las partes adyacentes dentro del sistema, aumentando paulatinamente su magnitud e intensidad hasta ocasionar el accidente. Por ejemplo, un vidrio que es golpeado con una piedrecilla minúscula puede romperse debido a que aquella ocasiona una falla –tal vez indistinguible a simple vista– que con el avance del tiempo se va agrandando continuamente, hasta finalizar con la ruptura del material. Términos semejantes pueden aplicarse inclusive, a nivel fisiológico, en donde un organismo que es capaz de autoregularse y diferir un poco más los efectos de la inestabilidad, la presentan mucho tiempo después; por ejemplo, una gran impresión emotiva (un susto, un disgusto, mala alimentación o la herencia, por decir algo) puede

derivar en diabetes, enfermedad que no aparece inmediatamente después del suceso, sino que se manifiesta con el transcurso del tiempo.

Decir entonces si existe determinismo o indeterminismo en la naturaleza depende del grado de creencia del prosélito. Para el autor, es admisible un determinismo flexible, pues lo encontramos implícito en muchas de las leyes de la física, incluida la mecánica cuántica; si bien la mecánica clásica es el paradigma de la tesis determinista, existen áreas de ella donde tal determinismo es parcial y no alcanza a explicar satisfactoriamente los eventos, aunque aún así puede darnos una idea de cómo evolucionan o se comportan los sistemas. Por ejemplo, en la dinámica de fluidos, si el flujo de fluidos presenta turbulencias o rotaciones, es muy difícil describir con precisión el evento, por lo que nos vemos en la necesidad de emplear aproximaciones de lo que ocurrirá después con el régimen del fluido. Igual ocurre en la teoría cinética de gases, o en la mecánica estadística, o en los sistemas océano-atmósfera acoplado, etc., donde el determinismo habitual no es, en primera instancia, tan confiable como en otros sucesos en los que funciona de manera excelente. En contraparte, en la mecánica cuántica la ecuación de Schrödinger, al ser una ecuación de onda y emplear el tiempo, describe satisfactoriamente la dinámica de las partículas atómicas, al menos hasta que intentamos observarlas, pues con esto hacemos que la onda ‘se colapse’. Earman coincide con el determinismo de la teoría cuántica al expresar que

Ernest Nagel has noted that “relative to its own form of state description quantum theory is deterministic in the same sense that classical mechanics is deterministic with respect to the mechanical description of state” (Nagel (1961), p. 306). There are important caveats to be discussed below but to the extent that Nagel is right he understates his case: quantum mechanics is *more* deterministic than classical mechanics. [...] Moreover, Schrödinger time evolution preserves the  $L^2$  norm  $\|\cdot\|_2$  on states (that is,  $\|\Psi(t)\|_2 = \|\Psi(0)\|_2$ ) implying stability in the past and future, in contrast to what happens in classical particle mechanics where sensitive dependence on initial conditions is often the case and where as a result precise prediction from initial data containing any error is an impossibility (see Ch. IX). And, again in contrast to classical particle mechanics, a confined quantum system (particles in a box) can never exhibit the property of mixing or any of the higher reaches of the ergodic hierarchy that in the classical domain helped to bridge micro-determinism and macro-randomness (see Ch. IX). In sum, quantum mechanics seems not only as deterministic but more deterministic, more predictable, and less stochastic than classical mechanics.<sup>23</sup>

Pero el determinismo es altamente controversial, por lo que sería más adecuado centrarnos en la relación causal, tal y como hizo Hume. Los argumentos de Hume son difíciles de rebatir puesto que hacen una concienzuda deducción que desglosa la

---

<sup>23</sup> Earman., *A primer on...* pp. 201-202.

sucesión que se presenta en una aparente relación de causa efecto, asegurando que un suceso que preceda a otro no necesariamente es el causante de aquél; es decir, Hume cuestiona la necesidad de ocurrencia y precedencia entre eventos, pero pienso que la objeción la lleva a cabo apegándose más al recurso lógico que a la verdadera ilación del comportamiento natural, pues para acceder a la ocurrencia de los sucesos habría que indagar el comportamiento de los objetos, y en distintos órdenes de magnitud, para comprender qué sucede con todos los niveles. Digo esto porque, quizá de manera muy simplista, primeramente abordamos la realidad por los efectos que observamos, haciendo que los fenómenos cobren existencia en cuanto ocurren, dándoles un supuesto ontológico; es decir, dado que no tenemos otra manera de abordar la realidad más que por lo que nos dictan nuestros sentidos, es conveniente llevar a cabo una cuantificación de nuestras experiencias sensibles para hablar con certidumbre de que ya tenemos conocimiento de algo, y que ese conocimiento es objetivo. Cuando Newton decía que no hacía hipótesis, se refería a esto precisamente, es decir, al no saber qué es la realidad, es preferible no especular, sino que en todo caso es más conveniente llegar a ella mediante deducciones a partir de sus efectos, y para ello, es más confiable una medición que una suposición. En este sentido, una medición ya es un dato conocido, y más objetivo, que una conjetura.

En el caso de la relación causal, se ve que ésta ha surgido de las metodologías involucradas en la observación, y ha perdurado a través del tiempo, mostrando su funcionalidad y eficacia explicativa. Aun así, el argumento de Hume en contra del determinismo es contundente, aunque para asegurar si efectivamente se cumple o no la relación causal, no sólo desde el punto de vista de la lógica, habría que indagar más concienzudamente y llevar a cabo análisis más minuciosos y profundos que permitan determinar con mayor certeza qué factores están inmiscuidos en la ocurrencia de un fenómeno, dado que puede haber un sinnúmero de variables que pueden afectar –de manera directa o indirecta, visible o invisible, intencional o accidental, continua o discreta, etc.– la ejecución o no del mismo. Es por ello que la deducción de Hume, aparte de impecable, se vuelve prácticamente imposible de rebatir porque basta encontrar un único elemento que cumpla con el aserto lógico (o que no satisfaga lo predicho por la “ley” causalista) para validar la tesis humeana, mientras que para certificar la relación de causa-efecto en forma positiva es menester comprobar que ésta se cumpla para todos y cada uno de los elementos de la naturaleza.

No obstante, y a pesar de tan impresionante deducción, me parece que mediante un proceso análogo al de Hume, basado en inferencias y abstracciones, podremos admitir que, dado que entre un sistema y su entorno hay interacciones continuamente, entonces existen fuerzas actuantes en ambas direcciones, y debe ser la superposición de tales fuerzas (y sus efectos) la que determina el comportamiento de los cuerpos materiales. Es en este sentido en el que se podría visualizar el por qué se alcanzan las regularidades estadísticas, y si tal regularidad abarca todos los objetos de una muestra muy grande, entonces podría extrapolarse a todos los objetos de la población, mediante un proceso inductivo; si en dicho proceso no se encontrara algún cuerpo que contravenga la regularidad, podría entonces establecerse un principio de carácter totalitario o universal que contemple todos los cuerpos del universo. Ejemplos de este tipo los tenemos en abundancia, quizá siendo de los más conocidos los efectos gravitacionales que ejerce un cuerpo muy másico –un planeta, por ejemplo– sobre otro de masa menor (la famosa manzana de Newton, por decir algo; en el caso que omitiésemos considerar la masa del planeta, estaríamos refiriéndonos entonces al peso de la manzana). Otro ejemplo de igual significancia es aquel en el que sólo admitimos dos tipos de carga eléctrica: positiva y negativa. Pero tenemos al alcance de la mano un ejemplo que es aún más contundente pues trata sobre la vida y la muerte de los seres vivos; hasta donde sé, nadie, absolutamente nadie, ha escapado de su propia muerte. En este sentido es obvio que se puede hablar de la existencia de una ley universal.

Ahora enfoquemos el problema de esta manera: ¿se podría hablar de equilibrio de fuerzas sin tener una referencia –aunque sea algo vaga e incierta– de una relación causal? Supongo que no, porque cuando hablamos de que un conjunto de fuerzas que actúan sobre una entidad material alcanzan un punto de equilibrio, tal y como nos lo indica la experiencia, estamos involucrando, tácitamente, la anulación de la fuerza total sobre el sistema, que es una justificación causalista; pero no sólo eso, sino que también debemos considerar, *a fortiori*, los efectos rotacionales que dichas fuerzas puedan ocasionar, por lo que debemos exigir también que no haya momentos de fuerza netos, es decir, deben satisfacerse simultáneamente ambas condiciones para el equilibrio (traslacional y rotacional), es decir:

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0,$$

y

$$\sum_{i=1}^n \vec{\tau}_i = 0 \tag{1}$$

pero esto, insisto, está relacionado con una relación causal; de hecho, decimos que si la fuerza y la torque netas externas que actúan sobre un sistema son nulas,<sup>24</sup> el sistema se encuentra en equilibrio;<sup>25</sup> a su vez, decimos que un sistema se encuentra en equilibrio si la fuerza y torque netas externas que actúan sobre él son nulas; es decir, establecemos condiciones lógicas de necesidad y suficiencia al hablar de equilibrio, expresándolo clásicamente como:<sup>26</sup>

$$\text{Equilibrio} \Leftrightarrow \begin{cases} \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0 \\ \sum_{i=1}^n \vec{\tau}_i = 0 \end{cases} \tag{2}$$

Así, decimos que un cuerpo se encuentra en equilibrio si y sólo si fuerza externa neta y la torque externa neta que actúan sobre él son cero. Es necesario decir que esto también

<sup>24</sup> Cuando decimos que las fuerzas netas son nulas, estamos significando que las fuerzas actuantes sobre el sistema anulan sus posibles efectos unas con otras. Por ejemplo, si un cuerpo yace en reposo, no quiere decir que sobre él no actúen fuerzas; lo que decimos es que la fuerza neta sobre él es cero, es decir, la fuerza neta es nula.

<sup>25</sup> El equilibrio de un sistema no necesariamente implica el reposo, puesto que el cuerpo puede estar moviendo con velocidad traslacional constante, por lo que la aceleración de traslación es cero, es decir:  $\vec{F}_{neta} = m\vec{a}$ , pero  $\vec{a} = 0$ , por tanto,  $\vec{F}_{neta} = 0$ . Igual ocurre con las cantidades rotacionales, ya que si el cuerpo gira alrededor de un eje de rotación (que pasa por algún punto del cuerpo) con velocidad angular constante, entonces la aceleración angular es cero, y dado que la torque neta es:  $\vec{\tau}_{neta} = I\vec{\alpha}$ , y  $\vec{\alpha} = 0$ , entonces se sigue que  $\vec{\tau}_{neta} = 0$ , con  $I$  = momento de inercia (lo mismo ocurre con el equilibrio dinámico, que suele estar dado en términos del lagrangiano). Este manejo de fuerzas a menudo se expresa por sistemas de ecuaciones diferenciales.

<sup>26</sup> Estas expresiones también suelen expresarse, de manera explícita como:  $\vec{F}^{ext} = \sum_i \vec{F}_i^{ext} = 0$ , y:  $\vec{\tau}_{CM}^{ext} = \sum_i (\vec{r}_i - \vec{R}) \times \vec{F}_i^{ext} = 0$ , donde  $\vec{r}_i$  y  $\vec{R}$  son los vectores de posición de la  $i$ -ésima partícula y del centro de masas, respectivamente. Estas expresiones aluden solamente a las fuerzas externas que actúan sobre el sistema de partículas o el cuerpo rígido, puesto que la fuerza neta debido a las fuerzas internas es nula dado que las fuerzas internas se anulan por pares; lo mismo ocurre con las torques internas. Para una mayor comprensión de este tema se puede consultar: Barger, V. & Olsson, M. (1973): *Classical Mechanics. A Modern Perspective*; McGraw-Hill Series in Fundamentals of Physics: An undergraduate textbook program. McGraw-Hill Book Company. USA. 1973. pp. 155-159.

vale para los sistemas dinámicos, aunque en este caso el modelaje del sistema sea mediante ecuaciones diferenciales (que, no obstante, manejan nuevamente la fuerza).

Inclusive al estudiar sistemas altamente dinámicos (v. g.: los cambios atmosféricos, patrones financieros o regímenes turbulentos de fluidos, sistemas estudiados por la Teoría del Caos) se ha observado que éstos exhiben comportamientos con cierta proclividad a ubicarse en puntos o regiones de equilibrio (órbitas) denominados *sumideros* o *atractores*<sup>27</sup> (según se hable de inestabilidad o estabilidad, respectivamente); dicho de otra manera, en este tipo de sistemas aparentemente se mantiene vigente la relación causal, a pesar de toda la aleatoriedad presente en los eventos. Esto nos motiva a pensar nuevamente en que la relación causal y el equilibrio de un sistema dado están indisolublemente hermanados, por no decir que existe cierto orden físico inherente a la materia que es lo que origina un comportamiento regularmente estadístico de fenómenos naturales que, vistos superficialmente, exhiben un comportamiento totalmente azaroso. Es claro entonces que el equilibrio –a veces casi instantáneo– es el causante de que los sistemas naturales puedan alcanzar patrones regulares en los que, de una u otra manera, las fuerzas aparecen involucradas, bien sea para explicar la relación causal o para explicar las regularidades estadísticas.

Empero, podría objetarse que la argumentación que aquí aparece está basada en conceptos que, de suyo, son estructuralmente deterministas (fuerza y leyes, por mencionar lo menos), y es cierto; aunque es admisible decir que estos conceptos, más que rígidamente deterministas, tienden a ser benévolo y permisivos respecto a cierto indeterminismo individual que a veces suele presentarse en un cúmulo bastante amplio de sistemas físicos constituido por muchas partículas –por ejemplo, en los gases o en el movimiento rotacional de los fluidos–. Y es que no se puede dar cuenta cabal de lo que ocurre en la totalidad del sistema pues es prácticamente imposible encontrar una relación causal estricta –o inclusive parcial– para todas y cada una de las partículas que

---

<sup>27</sup> En los sistemas dinámicos estudiados por la Teoría del Caos se admite que: “Un sistema estable tiende a lo largo del tiempo a un punto, u órbita, según su dimensión (atractor o sumidero). Un sistema inestable se escapa de los atractores. Y un sistema caótico manifiesta los dos comportamientos. Por un lado, existe un atractor por el que el sistema se ve atraído, pero a la vez, hay "fuerzas" que lo alejan de éste. De esa manera, el sistema permanece confinado en una zona de su espacio de estados, pero sin tender a un atractor fijo. Una de las mayores características de un sistema inestable es que tiene una gran dependencia de las condiciones iniciales. De un sistema del que se conocen sus ecuaciones características, y con unas condiciones iniciales fijas, se puede conocer exactamente su evolución en el tiempo. Pero en el caso de los sistemas caóticos, una mínima diferencia en esas condiciones hace que el sistema evolucione de manera totalmente distinta”. ([http://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa\\_del\\_Caos](http://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa_del_Caos)).

conforman el sistema y, aunque queramos hacerlo, es una labor titánica y prácticamente imposible de llevar a cabo, dado el número de partículas. No obstante, comúnmente podemos dar una descripción satisfactoria del comportamiento del sistema como un todo, sin fijarnos en el comportamiento de cada partícula como ente individual; y es aquí donde empleamos la estadística.

Dicho de otra manera, la probabilidad y la estadística, de manera conjunta con los conceptos físicos emanados de la teoría, habilitan la visión que tenemos, si no totalmente, sí lo suficientemente determinista respecto a la evolución de un sistema que conste de muchas partículas al tomar en cuenta valores promedio que nos permiten establecer y configurar adecuadamente el conjunto de variables fundamentales que serán seguidas con el transcurso del tiempo y que permitirán describir la evolución del sistema. Estas variables a seguir estarán cimentadas en conceptos físicos primarios que serán quienes permitan dar una explicación más creíble del porqué del comportamiento del cuerpo; sin duda alguna, uno de tales conceptos puede ser la fuerza, por ser de los conceptos dinámicos más elementales que nos permite explicar cómo se llevan a cabo los intercambios de energía y/o cantidad de movimiento, no sólo del sistema con su entorno, sino entre las partículas mismas. La fuerza, en tanto que propiedad extrínseca de un sistema, asumiría el rol de ser la mínima cantidad que permite explicar –a la vez que es explicada– la transferencia de propiedades que se conservan (o no) en la interacción de dos o más sistemas físicos. Es por eso que digo que la fuerza, a pesar de no aparecer explícitamente en algunos campos de estudio de la física, si bien no impone una relación causal absoluta y determinante en la evolución de un sistema, al menos lo hace parcialmente, pues

The world might be non-deterministic but still conditionally deterministic on a subset of magnitudes: if two worlds agree for all times on the values of the conditioning magnitudes and they agree at any instant on the values of the other magnitudes, then they agree at any other instant. Faith in strict determinism and the discovery of conditional determinism will prompt the search for additional laws that determine the evolution of the conditioning magnitudes, thereby removing the condition and restoring determinism simpliciter.<sup>28</sup>

Así pues, la fuerza, al igual que las leyes de conservación, se halla en el corazón de la física, y es un concepto que puede ser tomado como el equivalente al cuanto de acción del mundo microscópico, es decir: la fuerza sería la mínima representación de la relación

---

<sup>28</sup> Earman... *A primer on ...* p. 14

causal a la que tenemos acceso, una especie de ‘cuanto dinámico del mundo macroscópico’ –si se lo puede llamar así, en analogía con la expresión cuántica ( $E=h\nu$ )– que puede cuantificar la mínima cantidad de energía transmisible de, o hacia, un cuerpo.<sup>29</sup> Dicho de otra manera, la fuerza, por ser la intermediaria en la transmisión de información de un sistema a otro es quien posibilita la interacción entre ellos; tal información se propagaría, si se le ve clásica y continuamente, mediante líneas de campo o bien, en términos discretos, por una especie de ‘cuantos’ de fuerza –semejantes a las fuerzas impulsivas–, estando ambas visiones fuertemente relacionadas entre sí, tal y como lo están un punto y una recta.

Ahora bien, el concepto fuerza implica la acción a distancia, por lo que, para subsanar tal problema, se introdujo el concepto de campo (aunque resulta que ambos conceptos, fuerza y campo, están inextricablemente ligados). De hecho, a raíz del surgimiento de la teoría de la relatividad general, el concepto de campo se ha extendido a toda la física, constituyéndose, si se le puede llamar así, en la entidad básica e irreductible que sustenta y explica clara y convincentemente un sinfín de conceptos que posteriormente van apareciendo de acuerdo al proceso explicativo de un fenómeno dado (excepción hecha, quizá, de lo que es una partícula y una onda, aunque se admite que una onda macroscópica no es más que el resultado final de la superposición de las ondas de probabilidad cuánticas). Y es que la teoría de campos nos dice que éstos (los campos) son las entidades o cosas más simples que podemos encontrar, quedando perfectamente definidos por las ecuaciones de campo, por ser ellas quienes nos indican cuál es la dinámica que los gobierna, tanto en sus variaciones y cambios, como en su interacción con otros campos. Esto se apoya en conceptos de simetría,<sup>30</sup> que finalmente vienen a ser

---

<sup>29</sup> Podría objetarse que no todos los procesos pueden ser explicados en términos de la fuerza, y es verdad. Por ejemplo, podríamos hablar de que hay sistemas que salen de su estado de equilibrio por fluctuaciones en la frecuencia vibracional de sus moléculas, o por variaciones en la presión o la temperatura, etc. Sin embargo, siempre buscamos cómo está relacionada la fuerza con dichos parámetros, así por ejemplo, en variaciones de la frecuencia, vemos si el sistema puede entrar en resonancia o no; si es con la presión, es posible cuantificar la fuerza por unidad de área, etc. Evitamos el uso excesivo de la fuerza debido a que los sistemas suelen tornarse más complejos en su análisis, pero la fuerza siempre subyace en la descripción.

<sup>30</sup> Parece ser que inicialmente, después del Big-Bang, no hubo simetría en el Universo. Así lo da a conocer el Comité del Nobel de Física, al otorgarlo al trabajo: “*Ruptura espontánea de la simetría en la física subatómica*” que se produjo a raíz del descubrimiento de la tercera generación de quarks top del modelo estándar. Con este descubrimiento, se asegura que la materia y la antimateria no mantuvieron una simetría inicial en el universo y que “las rupturas espontáneas de simetría esconden el orden de la naturaleza debajo de una superficie desordenada”, según pronunció el Comité Nobel al entregar el preciado galardón en el año 2008. Asimismo, dijo que “si las leyes de la naturaleza fueran perfectamente simétricas, no habría seres humanos, no habría Tierra, no habría estrellas. En realidad, el Universo carecería de materia. La materia y la

determinantes para explicar, inclusive, las leyes de conservación que conocemos; así, si hablamos de campos, de alguna manera aludimos a las fuerzas, aun cuando éstas no aparezcan de manera explícita en la teoría.<sup>31</sup> Por otra parte, la manera en que habitualmente percibimos cómo se manifiesta un campo es mediante sus fluctuaciones, que genera ondas o se manifiesta mediante las fuerzas.<sup>32</sup>

En el contexto de la física clásica, el concepto fuerza funge como el equivalente de la relación causal más inmediata que tenemos, y es tal su relevancia que aparece, bien sea explícita o implícitamente, en otros conceptos: trabajo, energía, cantidad de movimiento, momentos de rotación, etc., y después se propaga a toda la física con sus debidas adecuaciones. El concepto de fuerza, al ser un sustrato elemental, nos permite explicar, por ejemplo, por qué las sustancias materiales adoptan la forma en que las vemos y por qué se mantienen así, pues el estado y configuración de los objetos dependen de la

antimateria se hubiesen anulado mutuamente después de la explosión inicial, el *Big Bang*. Por la investigación de las rupturas de simetría en la naturaleza, que entre otros permitieron la “supervivencia” de un pequeño sobrante de materia, el físico estadounidense Yoichiro Nambu comparte con sus colegas japoneses Makoto Kobayashi y Toshihide Maskawa el mayor premio de su disciplina.” (Comité Nobel de Estocolmo. Tomado de: *La Jornada*. 8 de Octubre de 2008).

<sup>31</sup> Por ejemplo, en la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad no se maneja la fuerza, sino que se maneja la cantidad de movimiento, por dar lugar a un principio de conservación: la ley de conservación de la cantidad de movimiento; sin embargo, la fuerza se relaciona con la cantidad de movimiento al tomar la tasa de

cambio de éste con respecto al tiempo, es decir:  $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt}$ . La cantidad de movimiento vale a

cualquier nivel, microscópico o macroscópico; es decir, se cumple en los niveles clásico, relativista o cuántico, mientras que la fuerza necesita “ajustes”, dependiendo de qué estamos trabajando. En la relatividad,

por ejemplo, la fuerza estaría dada por  $\vec{F} = \frac{d(\gamma m \vec{v})}{dt}$ , donde  $\gamma = \left[1 - \frac{v^2}{c^2}\right]^{-1/2}$ . Además, la energía

cinética frecuentemente se expresa como:  $T_k = \frac{p^2}{2m}$ . Es claro entonces que la fuerza se relaciona con la

cantidad de movimiento y con la energía, al relacionarse con el trabajo. La fuerza en términos de la energía

potencial es:  $\vec{F} = -\nabla U$ . La energía total de un sistema está dada en términos de la energía mecánica, o en términos del hamiltoniano del sistema. El por qué de esto se debe a que el concepto fuerza suele ser más complicado de trabajar por ser una cantidad vectorial y la energía es un escalar; en el caso de la cantidad de movimiento, ésta cantidad también es un vector, sin embargo, se privilegia su uso sobre el de la fuerza por tener asociada una ley de conservación; sin embargo, la fuerza siempre se asocia a la interacción de los sistemas.

<sup>32</sup> Pero como se mencionó apenas unas líneas antes, el campo se introdujo para eliminar el problema de acción a distancia; sin embargo, debido a la comprobación experimental de la paradoja EPR (por Einstein-Podolski-Rosen), parece ser que la acción a distancia existe y no causa grandes problemas. (La paradoja consiste en un experimento ideal en el que se pretendió demostrar que la completud de la mecánica cuántica es inexistente, además de poner de manifiesto el efecto de acción a distancia de las fuerzas, acción que se transmitiría a velocidades supralumínicas, violentando con ello uno de los supuestos de la teoría de la relatividad).

intensidad de las fuerzas internas entre las partículas que conforman los cuerpos (v. g.: fuerzas de cohesión, electrostáticas, de adhesión, etc.). Son estas fuerzas internas, imperceptibles para nosotros, las que solemos ignorar a la hora de referirnos al comportamiento de un sistema en un ambiente dado, pero son ellas 'el mecanismo interno' que mantiene la aglutinación (o en su defecto, pueden ser causa de la disgregación) de las partículas que constituyen los cuerpos materiales.

La ontología de las fuerzas, creo, está fuera de toda duda; asimismo, y por añadidura, podemos pensar que son ellas quienes, a pesar de no suministrar información más completa de cuál (y cómo) es la relación causal –pues no nos permite determinar con claridad los nexos reales entre el suceso que funge como “causa” y el suceso que se asume como “efecto”– sí nos permiten indagar con mayor verosimilitud la ocurrencia de los fenómenos naturales; es decir, podemos constreñirnos al hecho de que una fuerza posibilita establecer –así sea lógicamente– con mayor claridad quién es el evento denominado causa y quién es el efecto, pues es más fácil averiguar, mediante las fuerzas, cuándo un cuerpo produce “algo” capaz de influir, mediante algún modo particular de transmisión, a un objeto ubicado en sus vecindades, o bien, podemos percatarnos cuál evento afecta al otro (u otros) y causa perturbaciones que se traducen en la modificación del estado inicial que guardaba el segundo objeto. La fuerza es, por lo tanto, una “manifestación causal” de la naturaleza, manifestación que puede manejarse incluso de

manera operativa, haciéndolo funcionalmente como:  $\vec{F} = f(\vec{r}, \dot{\vec{r}}, t)$  y quedando determinada unívocamente para el estado que guarda el sistema en cualquier instante  $t$ .

Y es natural pensarlo así, pues la fuerza nos introduce a un determinismo funcional, que puede expresarse como una función que puede tener, incluso, un punto singular; es decir, el determinismo representado por la fuerza puede asumir la tesitura de una función analítica<sup>33</sup> y seguir siendo explicativa de los acontecimientos; en ello radica buena parte de su fortaleza. Por ejemplo, si consideramos la fuerza entre dos cargas eléctricas puntuales,<sup>34</sup>  $q_1$  y  $q_2$ , separadas entre sí una distancia dada por  $\|\vec{r}_2 - \vec{r}_1\|$ , tenemos que la fuerza ( $\vec{F}_2$ ) sobre la carga  $q_2$  debido a la carga  $q_1$ , está dada por la Ley de Coulomb:

---

<sup>33</sup> La función es analítica en  $x_0$ , siempre que pueda expresarse por una serie de Taylor que converge a  $f(x)$  cuando  $x$  esté en un intervalo que contiene a  $x_0$ .

<sup>34</sup> Una carga puntual es una idealización de una carga eléctrica distribuida en un volumen, pero que se concentra en un punto. Dicha carga quedaría descrita por:  $\rho(\vec{r}) = q\delta(\vec{r})$ , donde la delta es la delta de Dirac.

$$\vec{F}_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{\|\vec{r}_2 - \vec{r}_1\|^3} (\vec{r}_2 - \vec{r}_1), \quad \text{con } \vec{r}_2 \neq \vec{r}_1 \quad (3)$$

donde vemos que la función se indetermina en el punto:  $\vec{r}_2 = \vec{r}_1$ . En este punto la función tiene un punto singular, pero sigue siendo analítica; no obstante, tal punto se contempla y se excluye sin pérdida de generalidad al darle la significancia física de que en dicho punto la expresión carece de sentido pues una carga no experimenta su propia fuerza, es decir, no interactúa consigo misma. Asimismo, se puede obtener una bola de radio muy pequeño de tal suerte que la función no se indetermina y la función continúe siendo analítica.<sup>35</sup> Con esto se percibe que la fuerza puede adoptar el papel de eslabonador de eventos, y a pesar de haber entre sucesos contiguos pares de fuerzas de acción-reacción (3ª Ley de Newton), dado que hay una dirección preferente de transmisión del evento, eso implica que: o bien el medio posee una isotropía desigual que privilegia el avance en una dirección –cosa muy improbable– o los pares de fuerzas deben tener puntos de aplicación distintos, al menos entre el primer eslabón (causa) que transmite la fuerza, y el último, que sería el que la recibe (efecto), pues éstos están en contacto con el entorno. Esta sería una posibilidad más clara de explicar la relación causal.

Por otra parte, y como se mencionó anteriormente, con el advenimiento de la teoría de la relatividad, se cayó en la cuenta de que la fuerza requiere ajustes pues su descripción, al igual que la del evento, depende tanto de la velocidad, la traslación o rotación de los observadores, y debido a que la fuerza es un vector, es preciso estipular con toda precisión el marco de referencia para que quede unívocamente determinada. Esto, asociado a la no simultaneidad de los eventos, (posiblemente) a la no invariancia<sup>36</sup> de las magnitudes fundamentales y quizá junto a la covariancia de los distintos sistemas coordenados, da pie para que se pueda pensar que la fuerza no es la variable adecuada para representar la relación causal, optando por otras cantidades físicas, tales como la

---

<sup>35</sup> Esto se da porque si encontramos el campo eléctrico de una carga puntual, éste está dado por  $\vec{E}(\vec{r}) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^3} \vec{r}$  pero dado que  $\nabla \cdot \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^3} \vec{r} = \frac{1}{\epsilon_0} q \delta(\vec{r})$ , se ve nítidamente que la delta de Dirac permite aplicar el teorema de la divergencia de Gauss (asociado con la Ley de Gauss) a una carga puntual ubicada en  $\vec{r} = \vec{0}$ , que no es más que una singularidad en el origen.

<sup>36</sup> En forma por demás simple puedo decir que el principio de invariancia es de carácter geométrico –al menos en el marco de referencia espacio-temporal habitual–, modificando sólo el estado de movimiento de un sistema sin que cambien los acontecimientos; es decir, el principio de invariancia sólo cambia la localización del evento en el espacio y en el tiempo. El principio de covariancia, por su parte, proporciona la separación de los eventos en el marco espacio-tiempo, al proporcionar la variación de las respectivas coordenadas cuando se va de un referencial a otro. Claramente, también es de naturaleza geométrica.

cantidad de movimiento o la energía, que por cierto, también han sido sumamente utilizadas en la física clásica, pues proveen una manera alternativa de explicar los fenómenos físicos, al grado que:

En mecánica clásica ha habido siempre dos puntos de vista diferentes relativos al concepto de “fuerza”. Desde uno de estos puntos de vista se consideraba la fuerza como “la variación en la unidad de tiempo de la cantidad de movimiento”, mientras que desde el otro se la consideraba como “la variación de energía por unidad de longitud”. Los diferentes autores han destacado alguno de estos aspectos con preferencia sobre el otro. Así, Galileo desarrolló el primero, mientras que Huygens se ocupó del segundo. A la luz de los vectores tetradimensionales ambas ideas pueden unificarse y difieren sólo si se las considera como aspectos parciales de un concepto más amplio.<sup>37</sup>

No obstante, el uso de estas cantidades no excluye la fuerza, pues ésta es el concepto paradigmático de la relación causal, y aunque a veces parezca no ser útil para sostener el determinismo en otras áreas de la física, siempre regresamos a ella; buen ejemplo de esto son las fuerzas (o interacciones) fundamentales de la naturaleza, que se verán más adelante. Sin embargo, y aun admitiendo como válidas las objeciones contra la fuerza y la relación causal, pienso que tales objeciones en realidad no alcanzan a deshacerse totalmente de dicha relación (causal), pues siempre pervive –así sea lo más débil posible– su parentesco con la fuerza, por ser ella quien efectivamente brinda la posibilidad de explicar por qué un sistema se comporta como lo hace después de haber interactuado con otro sistema o evento que modificó el estado que guardaba (el sistema bajo estudio) antes de la interacción; esto nos obliga a tener en cuenta todos los factores que puedan involucrarse en la ocurrencia de un fenómeno para determinar quién es la causa –que por supuesto que la hay, aunque no sea la que habitualmente pensamos que sea– y dentro de tales factores aparecerá, invariable y obligadamente, la fuerza, por que pareciera ser que la fuerza es el mínimo concepto dinámico natural que permite deducir el encadenamiento y ocurrencia de los sucesos, convirtiéndola así en el representante físico más idóneo de la relación causal. Martínez lo explicita más apropiadamente cuando dice que

Es indudable que el desarrollo de la ciencia moderna a partir de Newton se ha esforzado en mostrar la dispensabilidad de conceptos modales en la ciencia. Así, el newtonianismo, sobre todo a partir de la formulación de Lagrange, se formula como una teoría deductiva de la mecánica que no requiere de ninguna noción física irreductible de causa para explicar el movimiento de los cuerpos. En la teoría de la relatividad de Einstein se deifican las trayectorias luminosas posibles sobre la base de las cuales se

---

<sup>37</sup> French, A. P.(1988): *Relatividad especial. MIT Physics course*; Ed. Reverté; Barcelona. Reimp. 2002. p. 258.

describe la geometría del espacio tiempo. En la mecánica estadística el espacio de fase deifica las posibles trayectorias de un sistema, lo que permite un análisis puramente extensional (conjuntista) de la dinámica de sistemas estadísticos.<sup>38</sup>

Aproximadamente en el mismo sentido se manifiestan Taylor y Wheeler cuando aseguran que en el seno de la teoría de la relatividad, la fuerza sigue siendo un concepto vital, pues:

To understand the nature of the concept, “force”, try to imagine how one could get along without it! Force is most obviously needed to explain why a particle speeds up or slows down. A test particle, subject to no forces, is defined precisely by the fact that it does not speed up or slow down. Relative to an inertial frame it continues to be in a state of rest or in motion at constant velocity. It traces out a straight world line. [...] No one has has never found such a change in velocity to take place without something to cause it –typically either a collision with a nearby particle or a force caused by a distant particle–. Therefore, force can be said to be a form of interaction. This way of speak is further justified by two additional circumstances: (1) When the presence of (particle) A brings about a change in the velocity of (particle) B, the presence of B also causes an interaction in the velocity of A. (2) After the interaction has ended and the particles have separated, the change of momentum of one particle is equal in magnitude and opposite in direction to the change of momentum of the other particle. Thus, instead of talking about forces between particles, we can talk about their changes of momentum. Indeed to discuss both momentum and forces in the context of relativity is to complicate the story. In this account we analyze momentum alone.<sup>39</sup>

Así, la fuerza –o en su defecto, el campo– sería entonces el concepto básico y fundamental que garantiza no nada más la validez, sino también la funcionalidad de la relación causal, no obstante la dificultad que a veces representa trabajar con ella (con la fuerza).

### 2.3 Las regularidades estadísticas

De lo anteriormente expuesto, parece claro que cuando hablamos de regularidades estadísticas –sea que asumamos cualquiera de las posturas, determinista o indeterminista– implícitamente manejamos una justificación causalista, y es que las evidencias que tenemos debidas a la experiencia nos indican que cuando un sistema físico está desbalanceado, es porque hay fuerzas o torques que no se han anulado

---

<sup>38</sup> Martínez, S.: *La objetividad del azar en un mundo determinista*; en *Crítica*, Revista Hispanoamericana de Filosofía; Vol. XXII, No. 65 (agosto, 1990): 3-21. p. 5

<sup>39</sup> Taylor, E. F. & Wheeler, J. A. (1982): *Space Time Physics. Introduction to special relativity*; 2ª. Ed.; W. H. Freeman & Co. pp. 101-102.

completamente, y el sistema no se encuentra en equilibrio,<sup>40</sup> y si no está en equilibrio, es inestable, y si es inestable puede modificar su comportamiento. Ahora bien, aquí explícitamente se alude al equilibrio mecánico –o físico, si se le desea llamarse así– pero igual valdría el caso para el equilibrio químico, o el equilibrio biológico, o ecológico, etc. Por ejemplo, ¿bajo qué supuestos o condiciones podemos hablar de equilibrio químico? Pongamos por caso que consideramos dos recipientes: uno con agua y otro con ácido sulfúrico; mientras no haya una combinación de ambas sustancias, éstas –cada una por su lado– están en equilibrio; pero una vez mezcladas, el equilibrio se “rompe”, dando pie a una reacción química exotérmica. En estos instantes, el sistema no está en equilibrio, pues habría “algo” que ocasiona un desbalanceo energético (intercambio de información de algún tipo a nivel atómico, es decir, hay interacciones atómicas que pueden darse, incluso, por la cesión o captación de partículas) y en consecuencia, el sistema es inestable. Obvio es concluir que conforme transcurra el tiempo, el sistema (la mezcla de sustancias) llegará a un estado en que habrá alcanzado su nivel de “energía mínima”,<sup>41</sup> es decir, se ha llegado al equilibrio, mostrándose como una sustancia químicamente inerte, es decir, una sustancia que ya no reacciona por sí misma. Lo mismo, creo, puede proponerse acerca de los sistemas biológicos.

Es por esto que me es más sencillo, conceptualmente hablando, admitir la postura determinista, y no nada más en estricta dependencia directa del tiempo –según lo maneja Popper con insistencia, obligando a tal postura a autopredicirse en el futuro, a partir de

---

<sup>40</sup> Cuando hablo de estabilidad, estoy refiriéndome a las distintas posibilidades de equilibrio que podemos tener; por ejemplo, en el caso de sistemas conservativos: (a) **el equilibrio estable**, que es cuando la energía potencial de un sistema alcanza un valor mínimo en un punto, llamado punto de equilibrio, por lo que la fuerza es cero, es decir:  $\vec{F}(\vec{r}) = -\nabla U(\vec{r}) = 0$ ; aquí, si el sistema se desplaza ligeramente de su posición de equilibrio, presenta oscilaciones alrededor del punto de equilibrio (que está acotado por puntos de retorno) y lo hace debido a fuerzas de restitución, que son quienes causan que el sistema retorne al punto de equilibrio. (b) **equilibrio inestable**, que es donde la energía potencial alcanza un valor máximo, pero aún se satisface que la fuerza neta sea cero; aquí el sistema permanece en reposo, pero si se “saca” ligeramente del punto de equilibrio, comienza a moverse y ya no regresa a él, por lo que sólo un agente externo puede restituirlo a tal punto y, (c) **equilibrio neutro**, que es donde la energía potencial adquiere un valor constante y la fuerza neta es cero; aquí el sistema puede desplazarse ligeramente sin que experimente fuerzas de restitución. Para los sistemas dinámicos, el equilibrio puede hallarse mediante sistemas de ecuaciones diferenciales y las curvas de fase. Así, si expresamos la fuerza (conservativa y con función de potencial asociada,  $V(x)$ ) en una dimensión como:  $F(x) = m\ddot{x}$ , con  $F$  = analítica para todos los valores de  $x$ , el sistema de ecuaciones diferenciales queda:  $\ddot{y} = \ddot{x}$  y  $\dot{y} = F(x)/m$ , y si  $(x_c, 0)$  es el punto crítico del sistema, se puede ver que si  $V(x)$  tiene un mínimo relativo en  $x=x_c$ , entonces  $(x_c, 0)$  es un centro de la trayectoria y hay equilibrio estable. Igualmente, si en  $x=x_c$  hay un máximo relativo,  $(x_c, 0)$  es un punto silla y el equilibrio es inestable; y por último, si hay deflexión horizontal en  $x=x_c$ , entonces  $(x_c, 0)$  es una degeneración vorticial y el equilibrio también es inestable. Si las fuerzas no son conservativas, los puntos de estabilidad del sistema se buscan –si los hay– aplicando los criterios de Liapunov.

<sup>41</sup> O entropía máxima, si se desea ver en términos de desorden después del proceso de mezclado.

condiciones iniciales y de condiciones de frontera— sino más bien entendido el determinismo como *aquel supuesto que permite determinar (o pronosticar) en un marco de referencia inercial dado, y con un grado de precisión previamente definido, la evolución del sistema, y donde los sucesos constituyentes se entrelazan entre sí —lógica y/o físicamente— para mantener una secuencia de avance monótonamente creciente que proporciona unívocamente, y para cualquier instante en el referencial especificado, una respuesta del sistema. El evento resultante de la conjunción de sucesos se denomina efecto y los sucesos que motivan la respuesta se denominan causas.* Es evidente que el determinismo visto de este modo carece de la rigidez declarada por Laplace, y aún está afinado en la causalidad, pues sin ella no habría posibilidad ninguna de que exista la regularidad estadística.

Así, las contingencias se deben a inestabilidades de los sistemas, y a menos que éstos sufran una ruptura o un daño irreversible que impida identificarlos como los sistemas originales, entonces las fuerzas de restitución tienden a hacer que regresen a su estado de comportamiento regular o habitual; dicho más simple: cuando observamos que un sistema se encuentra fuera de su estado de equilibrio, inmediatamente tiende a retornar a su estado de mínima energía, o bien, “busca” como llegar a otro estado con la menor inversión de energía. Esto es consistente con lo que la experiencia nos ha enseñado; y ejemplos tenemos de toda clase, siendo casos ejemplares el de los animales o personas que se agitan por correr, o bien, cuando se excitan por alguna razón (por ejemplo, por enojo o exultación); después de este estado anormal, caen a un estado más relajado donde la inversión energética sea un mínimo. En un caso típico de la física, tenemos la excitación de los electrones. Cuando un electrón es excitado por un agente externo, salta de orbital y al regresar a su orbital base, emite parte de la energía absorbida, haciéndolo en forma de radiación electromagnética.

Pero la cuestión radica entonces en cómo se explicarían en términos indeterministas estos eventos. Es claro que cuando abordamos el comportamiento de un sistema, lo primero que hacemos es ver si su comportamiento es fortuito, y empezamos a adentrarnos en el problema buscando una causal que nos indique el por qué de tal proceder; para ello inmediatamente indagamos con quién, y cómo, interactúa, pues su entorno puede influir en su comportamiento y determinar su respuesta. Si el sistema se comportara de manera completamente aleatoria estaríamos en problemas de comprensión y modelaje, por lo que buscamos inmediatamente las posibles repeticiones o

comportamientos semejantes que nos den una pista acerca de qué agente determina un comportamiento como el que se nos presenta.

Así, un indeterminismo tan puro como aquél que no considera las posibles causales, es decir, un indeterminismo visto en términos absolutamente aleatorios lleva aparejado otro problema, pues un mundo puramente probabilístico trae como consecuencia inmediata no sólo la incapacidad de explicar el suceso, sino que también pone en entredicho muchas leyes de conservación, algunas de ellas que se consideran universales –y también válidas hasta este momento–, leyes que han demostrado continuamente su solidez conceptual al resistir los más exhaustivos escrutinios experimentales a que han sido sometidas; por ejemplo, las leyes de conservación de la masa, de la energía, de la carga eléctrica, de la cantidad de movimiento, etc. Tal y como se ha mencionado antes, estas leyes de conservación se deben a las leyes de simetría, por ser ésta (la simetría) la causante de la preservación de ciertas cantidades o magnitudes en los sistemas dinámicos; por ejemplo, vemos que en una colisión la cantidad de movimiento se conserva, es decir, la cantidad de movimiento es simétrica respecto al momento del choque.<sup>42</sup> Así, si admitiéramos solamente la regularidad estadística en las leyes de conservación, eso nos podría conducir a casos donde las leyes de conservación pueden no cumplirse, y entonces habría que ajustar no sólo los enunciados de las leyes de conservación,<sup>43</sup> sino que

---

<sup>42</sup> Al parecer, sólo hay una ley de conservación que se ha derrumbado: el denominado “derrumbe de la paridad” –aplicado en la desintegración de partículas– al encontrarse que la simetría entre la izquierda y derecha en la naturaleza no se conserva.

<sup>43</sup> Estas leyes se demuestran matemáticamente en el Teorema de Noether, que “*presenta una correspondencia entre cada principio de conservación de una magnitud física (energía, impulso, cantidad de movimiento) y una invariancia formal de las leyes de la física. Dicho de otro modo, para toda simetría continua (por ejemplo, una rotación espacial) del lagrangiano del sistema, hay una magnitud conservada a lo largo de la evolución del mismo. Las conclusiones más interesantes se obtienen en el caso de las transformaciones euclídeas, como las espaciales, las rotaciones o las temporales, esto es, en aquellos casos en que la transformación no deforma los objetos. En estos casos simples, el teorema de Noether conduce a los siguientes resultados: (1) Cuando un lagrangiano es invariante bajo traslaciones del tiempo, su expresión formal no cambia al variar la variable tiempo, entonces la energía total de sistema se conserva durante el movimiento. (2) Si es invariante el sistema por traslación espacial, la magnitud conservada es el impulso o momento lineal, y (3) Cuando es invariante por rotación, se conserva el momento angular.*” (Tapia-Moreno, F. J. (2002).pdf: *Apuntes de historia de las matemáticas. Vol. 1*; mayo, 2002. Inst. Mats. Universidad de Sonora. pp. 55-60). En el mismo sentido se pronuncian Lahiri & Pal, al decir que: “*Some Lagrangians are known from basic physics. But generally a system may not be as well understood, and we to construct a Lagrangian that we expect to describe the system. In such constructions, it is often useful to rely on symmetry, i. e., transformations which leave the system invariant. It so happens that associated with each symmetry of a system is a conserved quantity. Thus if we know some conserved quantities of a system we can work backwards to find the symmetries of the system and from there make a guess at the form of a convenient Lagrangian. The result which relates symmetries to conserved quantities is known as Noether’s theorem after its discoverer, while the conserved quantities are called Noether charges and Noether currents.*” (Lahiri, A. & Pal, P. B. (2000): *A First Book of Quantum Field Theory*. 2<sup>nd</sup> Ed. Alpha Science International Ltd. Harrow,

también habría que buscar una explicación coherente de porqué, y bajo qué condiciones no se cumplen las multicitadas leyes.

Es pues admisible la deducción de Hume –aunque desde un punto de vista lógico y a nivel macroscópico– de que es sólo la costumbre la que nos orilla a suponer que vale la relación causa-efecto en el mundo natural; no obstante, tengo la convicción de que, en los más profundos reductos de la naturaleza debe existir una relación causal fuerte que dé lugar a las regularidades que se manifiestan al observar nuestro entorno. Sostengo esto porque, *si bien es plausible pensar que hay causas sin efecto, me es imposible admitir que existen efectos sin causas*. Además, y de manera reiterada, me parece que no tenemos en este momento una teoría que dé una explicación totalmente convincente del acontecer de las cosas, pues siempre vamos involucrando variables que antes no se consideraban y que vienen a darle mayor amplitud de miras al conocimiento. En este momento tenemos por ejemplo, lo que ocurre con la genética y sus descubrimientos que han venido a explicar el porqué de varias enfermedades. Un caso excepcional de esto que digo sería, hasta este momento, y de acuerdo a varios de sus apologistas, la mecánica cuántica, que se considera una teoría completa y que no requiere de variables ocultas. Aunque ha sido sumamente exitosa hasta hoy, parece que no todo mundo consiente esta tesis, pues estamos sujetos, nuevamente, a los dictados de la naturaleza; como ejemplo, a nivel del submundo atómico, la teoría estándar explica una ingente cantidad de eventos, no obstante, aún debe mostrar su real fortaleza teórica, al estar supeditada a la existencia del bosón de Higgs; Oerter lo enuncia con toda propiedad, al decir que:

Descubrimientos nuevos, como las oscilaciones de los neutrinos, la materia oscura y la energía oscura, nos fuerzan a concluir que la teoría de casi todo tiene deficiencias grandes. Consideraciones teóricas, como la incompatibilidad del modelo estándar, que es cuántico, con la relatividad general, que es una teoría clásica, apuntan en la misma dirección. Sin embargo, el modelo estándar ha estado reafirmando su valor durante 30 años. En un experimento tras otro ha proporcionado una estructura unificada que permite comprender el comportamiento de las partículas elementales con una precisión sin precedente en las predicciones. Por primera vez en la historia de la ciencia, hay una teoría que proporciona una descripción matemática precisa de la materia en todas sus formas y con todas sus interacciones, con excepción de la gravedad. [...] Estamos en un momento emocionante del desarrollo de la física fundamental [...] Hay mucha expectativa por el nuevo acelerador que se construye en CERN: el LHC (*Large Hadron Collider*). Si tiene éxito en producir la partícula de Higgs, sabremos mucho sobre la

---

U. K. p. 21.) También ya aparece la web en: <http://euler.mat.uson.mx/depto/publicaciones/apuntes/pdf/1-2-6-noether.pdf>. Otra alternativa de consulta se encuentra en el excelente artículo orientado al estudio de la dinámica, para casos singulares, de los fluidos y de los sistemas atmósfera/océano de: Ripa, P. (1992): *Sistemas hamiltonianos singulares. I: Planteamiento del caso discreto, Teorema de Noether*, que se publica en la Revista Mexicana de Física 38, Vol. 6, 1992. pp. 984-1004.

teoría más profunda que está detrás del modelo estándar, cualquiera que éste sea. Si no consigue producir tal partícula, el hecho mismo implicará que el modelo estándar necesita modificaciones. [...] Las teorías (hasta ahora) especulativas que van más allá del modelo estándar prometen llevarnos a escenarios aún más extraños. Al mismo tiempo, muestran el límite final de nuestra sabiduría.<sup>44</sup>

En el mismo sentido marcha Kuhn, al asegurar que

La entrada en física de un elemento probabilista aparentemente indeleble ha producido otro cambio radical en el principio de la explicación. Hoy hay cuestiones perfectamente configuradas sobre fenómenos observables, por ejemplo, el tiempo en el que una partícula alpha abandona un núcleo, fenómeno que los físicos declaran que es *en principio* inexplicable por la ciencia. Como acontecimiento concreto, la emisión de una partícula alpha y bastantes fenómenos semejantes no tienen causa. Toda teoría que quisiera explicarlos conduciría a un rechazo más bien que simplemente a una adición de la teoría de los cuantos. Quizá algunas transformaciones ulteriores de la teoría física cambiarán esta impresión, pero en este momento pocos físicos consideran el hiato causal (en sentido restringido) como una imperfección. Este hecho puede también indicarnos algo respecto a la explicación causal. [...] <sup>45</sup>

De la Peña<sup>46</sup> a veces también parece sumarse, así sea parcialmente, a una postura causal (o semi-causal) de la teoría cuántica, aún a sabiendas de que esto retorna la discusión a un problema de variables ocultas –por ser quien daría cuenta de la aleatoriedad del comportamiento de las criaturas atómicas– pues “cuando ha habido necesidad de ello, se ha adoptado la posición causal”,<sup>47</sup> y

La interpretación usual, que *postula* que la teoría (cuántica) es completa, niega con ello que exista causa alguna de tal estocasticidad, insistiendo bien que se trata de la forma de ser del electrón, es decir, de un fenómeno irreducible a términos más elementales (el electrón se comporta *per se*, aleatoriamente como si gozase de una cierta dosis de libre albedrío); o bien afirmando que tal tipo de cuestiones carecen de sentido, pues implican pensar en el electrón como algo independiente de su observación, etc. Este problema, conocido como el problema del *indeterminismo de la física cuántica*, cae fuera del contenido natural del curso [...] Sin embargo, es importante señalar que es posible tomar una posición diferente y reconocer que estamos en presencia de un fenómeno cuántico esencial cuya existencia la física moderna acepta y de alguna forma incorpora, pero cuyo estudio a fondo ha sido omitido por razones más filosóficas e incluso ideológicas que físicas. Si se admite esta posición, se acepta con ello la existencia de otra causa fundamental de la incompletez de la teoría cuántica actual y la necesidad de ampliar el campo de investigación de la física cuántica hacia el estudio de sus propios fundamentos.<sup>48</sup>

---

<sup>44</sup> Oerter, R. (2008): *La teoría de casi todo. El modelo estándar, triunfo no reconocido de la física moderna*; Fondo de Cultura Económica. México. pp. 279-280.

<sup>45</sup> Kuhn, T. S., en: Bunge, M; Halbwachs, F; Kuhn, T. S.; Rosenfeld, L. & Piaget, J. (1977): *Las Teorías de la causalidad*; Ediciones Sígueme; España. p. 20.

<sup>46</sup> De la Peña, Luis (1979): *Introducción a la mecánica cuántica. 3ª. Ed.*; FCE-UNAM. México. 2010.

<sup>47</sup> *Ibid.*, p. 880.

<sup>48</sup> *Ibid.*, p. 39.

Es por lo anterior que pienso que no es posible prescindir de la relación causa-efecto a pesar de las dudas persistentes respecto a su existencia, pues el causalismo parece estar presente en el mundo natural, de tal manera que incluso las regularidades estadísticas serían causa de la ocurrencia de un sinfín de fenómenos; asimismo, es evidente que la relación causal suele apearse a la legislación propia de la física y, simultáneamente, es su principal bastión. En este sentido, es válido proponer que el problema ontológico de la causalidad, como principio fundamental de ocurrencia en la naturaleza, sea desechado y, en el último de los casos, sea mutado por un problema epistémico consistente en desentrañar quién es la causa de un evento. Así, la causalidad está a buen resguardo y más bien debemos clarificar qué entendemos por determinismo, pues esta palabra puede ser ambigua en sí misma, pareciendo significar, por un lado, que se alude directamente a la predicción de un evento a partir de una teoría, y por otro, que se señala un sustrato general ya predispuesto en la naturaleza, cosa muy improbable. Por ello, es deseable sugerir que el significado del determinismo sea definido, bien sea como sinónimo de la causalidad u operativamente, como el equivalente de un pronosticador teórico. En sentido parecido se pronuncia Kuhn al referirse a la causalidad, pues

Al igual que en otros análisis conceptuales, debe comenzar por la observación de palabras tales como «causa » y «porqué» cuando aparecen en las declaraciones y escritos de los hombres de ciencia. Este aspecto del análisis de la noción de causalidad está muy próximo a otro en el que Piaget ha insistido desde el principio, cuando afirma que debemos considerar el concepto de causa en un sentido restringido y en un sentido amplio. El primero deriva, pienso yo, de la noción inicialmente egocéntrica de un agente activo al que un sujeto empuja o atrae, sobre el que ejerce una fuerza o manifiesta un poder. Esto está muy cerca del concepto de causa eficiente en Aristóteles: noción que funcionó por primera vez significativamente en física técnica durante el siglo XVII en el análisis de los problemas de colisión. En cuanto al segundo es, al menos a primera vista, muy diferente. Piaget lo ha descrito como la noción general de explicación. Describir la causa o las causas de un acontecimiento es explicar por qué sucede y las propias explicaciones físicas son generalmente causales.<sup>49</sup>

Ahora bien, para evitar una postura tipo maniqueísta, en el sentido de descartar o aceptar la causalidad en definitiva, no perdamos de vista que estamos a la expectativa de lo que proporcionen las evidencias experimentales que justificarían si el bosón de Higgs es el último corpúsculo material –de hecho, el verdadero átomo de los griegos– o hay otras entidades más pequeñas que puedan constituir el mencionado bosón (de Higgs) o

---

<sup>49</sup> Kuhn., *op. cit.*, pp. 12-13.

una cuerda –en caso de que se maneje la Teoría de las Cuerdas–.<sup>50</sup> De igual manera, pudiera ser que la causalidad estuviese relacionada con las propiedades de la geometría espacio-temporal y su interacción con la materia, donde los esfuerzos del espacio-tiempo son los causantes del movimiento de la materia, tal y como se propone en la Teoría General de la Relatividad y en la Gravitación: la materia le dice al espacio cómo curvarse mientras que el espacio le dice a la materia cómo moverse. Algo equivalente podría ocurrir en las profundidades del átomo, y estas “curvaturas”, minúsculas e inexpugnables, debidas a la presencia de los objetos atómicos podrían ser los estados cuánticos que manejan Bohr y Heisenberg, o los estados estacionarios de Schrödinger. Si tal hecho fuese posible, quedaría explicado el por qué de una buena parte de comportamientos en los que aparece el cuanto de acción. Quizá incluso esto daría pauta para desenmascarar la dualidad de tales objetos, pues el comportamiento de onda se debería a la perturbación que sufriría el espacio que contiene (o sostiene) a la partícula, siendo tan intensa esta perturbación que aparecería en forma de una onda,<sup>51</sup> diluyendo las características corpusculares del objeto –igual que un surfista se pierde en la vastedad de la ola–, haciendo que centremos nuestra atención, al estar distantes del sujeto, en las características ondulatorias –el rastro o estela– que deja. Por el contrario, si tenemos interacciones con el corpúsculo atómico mediante colisiones con fotones, entonces es éste el que predominaría sobre la perturbación del campo.

Así, no me parece viable descartar de manera absoluta la existencia de la relación causal en la naturaleza, puesto que aún nos falta mucho por conocer, y por si fuese poco, el causalismo se ha hecho presente en el conocimiento contemporáneo al obtener resonantes éxitos en, por ejemplo, la mecánica celeste. Uno de los logros trascendentes más cercanos y notorios de la relación causal destaca en el descubrimiento de Plutón, por ser el causante de las variaciones que presentaba Urano; Percival Lowell concluyó que las perturbaciones que experimentaba Urano se debían a un cuerpo celeste que yacía en sus vecindades, y efectivamente, C. Tombaugh descubrió el hoy admitido planetaide.

---

<sup>50</sup> La teoría de las cuerdas es la teoría alternativa al modelo estándar, aunque no está demostrada plenamente. Dicha teoría asegura que una partícula no es más que la manifestación de una cuerda de energía baja, además de que impone restricciones a lo que podemos observar, puesto que si una cuerda tiene una energía mayor que la energía de Planck ( $10^{28} \text{ eV} = 10^{19} \text{ GeV} = 1.602 \times 10^{19} \text{ J}$ ), que es la escala fundamental para la gravedad, es imposible entonces observar distancias más pequeñas que las de la longitud de Planck ( $\approx 10^{-35} \text{ m}$ ).

<sup>51</sup> De hecho, decimos que una onda es una perturbación que transfiere energía, y se debe a las perturbaciones (o fluctuaciones) que experimenta un campo.

Inclusive, y aun cuando el determinismo no existiera (como sinónimo de la relación causal), es viable seguir pensando en él por comodidad –como un excelente sustento metodológico– debido a la sencillez y fortaleza predictiva que otorga a los modelos teóricos, potencializando las posibles explicaciones de los sucesos. De hecho, las leyes físicas gozan de un elevado grado de confianza por su poder explicativo, afincado en la relación causal (aún con ser unidireccional, al ir de la causa al efecto). Es poco dudoso que si no tenemos manera de dar cuenta del por qué de las regularidades estadísticas, lo primero que hacemos es introducir –tal y como Hume asegura: basados en la experiencia– las posibles relaciones causales; Woodward, por ejemplo, se cuestiona si la teoría causalista es privativa sólo de las ciencias empíricas por su inmediatez predictiva, pues parece que tal predisposición aparece entre muchos animales, pues

An important part of the appeal of a manipulability account of causation is that it provides a more straightforward and plausible answer to this question than its competitors [...] More important, a very substantial body of research has made it clear that a disposition to distinguish between (some) causal and noncausal sequences is widely shared among humans and many nonhuman animals, emerges early in development, and in some cases is remarkably fast and efficient, requiring relatively few trials or only limited evidence.<sup>52</sup>

Tal argumento es plausible, aunque contraría los asertos de Hume acerca de la razón de los animales, dado que el filósofo asegura que

Todos nuestros razonamientos están fundados sobre una especie de *analogía* que nos lleva a esperar de cualquier causa los mismos eventos que hemos observado que resultan de causas semejantes [...] En primer lugar, parece evidente que los animales, igual que los hombres, aprenden muchas cosas de la experiencia, e infieren que los mismos eventos siempre se seguirán de las mismas causas. [...] Es sólo la costumbre la que hace a todos los animales inferir a partir de cualquier objeto que se presente a sus sentidos su usual acompañante; llevando a su imaginación, con motivo de la aparición del uno, a concebir el otro de esta particular manera que llamamos *creencia*. Ninguna otra explicación puede darse a esta operación, tanto en las más altas como en las más bajas clases de seres sensitivos de los que tenemos noticia y caen bajo nuestra observación.<sup>53</sup>

Sin embargo, y sin entrar en detalles que no son de mi competencia, habría que indagar a profundidad si efectivamente los animales carecen de inteligencia como para negarles, de manera tan tajante, la capacidad de razonamiento –aun sea elemental o primitivo–, escamoteándoles la capacidad de efectuar inferencias, tal y como Hume lo

---

<sup>52</sup> Woodward, J. (2003): *Making things happen. A theory of causal explanation*; Oxford University Press. USA, 2003. pp. 28-29.

<sup>53</sup> Hume, D. (2004): *Investigación sobre el entendimiento humano*; Ágora de Ideas, Ediciones Istmo, S. A. España, 2004. pp. 235-238.

asegura; si tal es el caso, las objeciones de Hume serían admisibles y se estaría hablando de condicionamiento clásico; en caso contrario, se tendría que determinar por qué también los animales parecen justificar el principio de causalidad.

Por otra parte, y de acuerdo a la “definición” operativa del determinismo que se dio líneas arriba, es evidente que la teoría cuántica la satisface sólo parcialmente, puesto que utiliza el tiempo como una sucesión monótona para las observaciones, y se presentan eventos antecedentes que pueden fungir como causales de otros sucesos; claramente, en este sentido, sería determinista. Por otra parte, dado que la definición la he constreñido a un marco de referencia inercial (porque en estos referenciales las leyes de Newton mantienen plena validez; más aún, estos referenciales suelen aparecer dentro de la misma teoría relativista, pues es una condición deseable que el observador sea un observador inercial), entonces, salta a la vista que el Principio de Incertidumbre de Heisenberg, al no requerir de un referencial determinado, no es una expresión que proponga situaciones deterministas, por lo que prohijaría el azar. Habría que ver, sin embargo, si dicho principio tiene una aplicación indistinta en cualesquier marco de referencia. Mientras tanto, y por este hecho de uno de sus postulados principales, la mecánica cuántica resulta no ser determinista en el sentido clásico, alcanzando el rango de semi-determinista, puesto que en la ecuación de Schrödinger (que se verá después con más detalle) aparecen implícitos el determinismo y la continuidad de la onda; la teoría matricial es indeterminista y discreta, y por tal motivo, digo que la teoría cuántica es semi-determinista.

## 2.4 Causalidad y medición

Otro factor que influye en la suposición de que la causalidad se cumple en cualquier proceso natural proviene de aquellas experiencias donde la costumbre pasaría a segundo plano, al ser más controladas y mucho más sofisticadas, y donde ya aparece involucrada la medición; por ejemplo, experimentos llevados a cabo en el seno de la ciencia o de la tecnología. Y es que en ellas, la medición<sup>54</sup> asume un rol trascendental por ser el proceso

---

<sup>54</sup> En términos generales, la medición nos proporciona una estimación de resultados más confiable y objetiva que los resultados que nos proporcionan nuestros sentidos; la medición tiene como objetivo *determinar el valor de la cantidad particular a ser medida (mensurando)*. Una medición entonces comienza con una especificación apropiada del mensurando, el método de medición y el proceso de medición. [...] En general, el resultado de una medición sólo es una aproximación o estimación del valor del mensurando y entonces es

que nos permite cuantificar las experiencias adquiridas a raíz de nuestra interacción con la realidad (externa); dicho proceso consiste en comparar el objeto a medir con un referencial arbitrario al que tomamos, por convención, como unidad patrón (independientemente de cómo nos ha sido impuesto: por la costumbre o por decreto) y donde las medidas no consisten en un valor numérico único, sino más bien en intervalos que contienen o encierran el valor medio o esperado, llevándonos a tener como aspiración quimérica la exactitud de la medida.<sup>55</sup>

La medición cobra gran relevancia en el quehacer científico pues elimina mucho de la subjetividad propia del experimentador, además de que permite la comunicación de los resultados de nuestros trabajos después del estudio de algún fenómeno natural; y es que la medición provee mayor objetividad y veracidad a los resultados, promoviendo simultáneamente un estudio más concienzudo de los fenómenos naturales y una mayor precisión en el seguimiento de la evolución de los eventos; adicionalmente, al realizar mediciones más exhaustivas de algún tipo de suceso, es posible inferir, *grosso modo*, que es casi seguro que exista una asociación o relación directa entre las condiciones que guarda el estado previo de un sistema físico con las del estado subsecuente.

Tenemos entonces que, en primera instancia, la relación de causalidad parece ser ampliamente validada por las mediciones –y su subsecuente análisis estadístico– que se llevan a cabo principalmente en el ámbito de las ciencias fácticas pues, en la mayoría de los eventos macroscópicos bajo estudio se observa que, al variar un poco la causa, se presenta también una variación pequeña en el efecto resultante, y viceversa; un buen caso lo exponen dos diseñadores de experimentos, Cook y Campbell, citados por Woodward, quienes infieren de su trabajo estadístico de los datos que: “the paradigmatic assertion in causal relationships is that manipulation of a cause will result in the

---

*completo sólo cuando va acompañado por una declaración de la incertidumbre de esa estimación. En la práctica, la especificación requerida o definición del mensurando es dictada por la exactitud de la medición requerida. (Reporte técnico CNM-MED-PT-0002. (1994): Guía BIPM/ISO para la expresión de la incertidumbre en las mediciones. Centro Nacional de Metrología. México. p. 4).*

<sup>55</sup> La exactitud no es más que la dispersión que muestran los datos de lo que consideramos como valor exacto. En la web aparece la **precisión** como: *la dispersión del conjunto de valores obtenidos de mediciones repetidas de una magnitud. Cuanto menor es la dispersión mayor la precisión. Una medida común de la variabilidad es la desviación estándar de las mediciones y la precisión se puede estimar como una función de ella. Por otra parte, la **exactitud** se refiere a: qué tan cerca del valor real se encuentra el valor medido. En términos estadísticos, la exactitud está relacionada con el sesgo de una estimación. Cuanto menor es el sesgo más exacta es una estimación. (Wikipedia, la enciclopedia libre; [http://es.wikipedia.org/wiki/Precisi%C3%B3n\\_y\\_exactitud](http://es.wikipedia.org/wiki/Precisi%C3%B3n_y_exactitud)).*

manipulation of an effect ... causation implies that by varying one factor I can make another vary".<sup>56</sup>

En el mismo sentido se maneja en la teoría del caos, puesto que

Empezaremos con la parte anecdótica de la teoría del caos, el famoso "efecto mariposa" Es decir, comenzaremos a investigar el iceberg a partir de su punta visible que, como sabemos, es apenas una mínima fracción del total. En principio, las relaciones entre causas y efectos pueden examinarse desde dos puntos de vista: cualitativo y cuantitativo. Desde la primera perspectiva, las relaciones causa-efecto pueden ser concebidas de varias maneras: a) como vínculos unidireccionales: A causa B, B causa C, etc., pero los efectos resultantes no vuelven a ejercer influencia sobre sus causas originales; b) como eventos independientes: según esta concepción, no habría ni causas ni efectos: cada acontecimiento ocurriría al azar e independientemente de los otros; c) como vínculos circulares: A causa B, y B a su vez causa A, es decir, el efecto influye a su vez sobre la causa, como resultado de lo cual ambos acontecimientos son a la vez causas y efectos. Se trata de los llamados circuitos de retroalimentación, que pueden ser negativos o positivos. La teoría del caos, en la medida en que considera que existen procesos aleatorios, adopta la postura (b), pero en la medida en que dice que ciertos otros procesos no son caóticos sino ordenados, sostiene que sí, que existen vínculos causales. Causas y efectos son razonablemente proporcionales: pequeñas causas producen pequeños efectos, y grandes causas grandes efectos (como cuando decimos que, dentro de cierto espectro de variabilidad, cuanto mayor es la frustración mayor será la respuesta agresiva, siendo ambas variaciones razonablemente proporcionales); 2) Una causa pequeña produce un gran efecto (como cuando un comentario intrascendente desata una crisis psicótica); 3) Una causa grande produce un pequeño efecto (como cuando una interpretación nuclear que apunte directamente al conflicto patógeno infantil, genera una respuesta indiferente en el paciente).<sup>57</sup>

Y es que, en efecto, en la vida cotidiana y a escalas macroscópicas es, digámosle así, "natural" admitir la causalidad debido a la certeza<sup>58</sup> que brinda el conocer (o suponer) como es el comportamiento de sucesos contiguos, tanto en espacio como en tiempo; tal sería el caso de ver los nubarrones negros y esperar la lluvia, aun cuando sepamos (también por experiencia) que el simple hecho de que haya nubes no implique, necesariamente, que llueva. Pero hagamos a un lado la necesidad lógica y centremos nuestra atención en la concatenación de los eventos. Es lógico suponer que de la inmensa multitud de factores que confluyen y afectan un sistema, algunos de ellos puedan encadenarse uno tras otro de tal suerte que uno preceda temporalmente al otro y sea el causante de su posterior comportamiento; casos abundantes tenemos en la naturaleza, pero un ejemplo muy sencillo sería el caso de un taco de billar que golpea una bola (de billar) para que ésta se mueva, aunque aquí es obligatorio aclarar qué significa que el taco

---

<sup>56</sup> Woodward., *op. cit.*, p. 25.

<sup>57</sup> [http://www.antroposmoderno.com/antro-articulo.php?id\\_articulo=152](http://www.antroposmoderno.com/antro-articulo.php?id_articulo=152).

<sup>58</sup> Certeza en el sentido de que se tiene un conocimiento justificado de algo, al que se le ha dotado de significancia por considerársele seguro y evidente. Por ejemplo, si me golpeo la rodilla con un objeto sólido, tengo la certeza de que voy a sentir dolor.

“golpee” la bola, puesto que a nivel microscópico los objetos no se tocan realmente, por lo que los sucesos pudiesen no estar encadenados. Tal objeción tiene sentido y es válida pues lo que se desea es clarificar la relación que se da entre dos objetos, quizá incluso para observadores ubicados en marcos de referencia distintos –a los que únicamente se les exige que sean observadores inerciales, no importando si son relativistas o no; si son observadores inerciales, sólo habría que adicionar los factores de corrección debido a las rapidezces con que se mueven–; por lo pronto, y delimitando nuestro campo de estudio, que sería la bola, podríamos argumentar que son las interacciones mutuas entre el taco y la bola las causantes del cambio en el estado de movimiento de ésta última pues, de acuerdo a lo que sabemos por las leyes de Newton (los argumentos galileanos),<sup>59</sup> un cuerpo mantiene su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme hasta que una causa externa (es decir, una fuerza) modifique tal estado; esto nos conduce entonces a hurgar en las entrañas del acontecer de los eventos para encontrar y explicar satisfactoriamente qué ocasiona la alteración en el comportamiento de un sistema físico. Retomando el caso de la bola de billar y el taco, tendríamos que remitirnos a indagar qué ocurre a nivel molecular o atómico entre ellos. Para ello, deberemos apelar a las interacciones naturales conocidas actualmente, y cómo actúan sobre los cuerpos; a saber: (a) las fuerzas gravitacionales, que siempre son de atracción, de muy largo alcance y de muy pequeña intensidad, y son además, de carácter central. (b) Las interacciones débiles, que son de corto alcance y aparecen en el decaimiento de los átomos. (c) Las fuerzas electromagnéticas, que son de mediano alcance, y son de atracción o de repulsión. Son también de carácter central y son las más intensas después de las interacciones fuertes, y (d) las interacciones fuertes, que son de muy corto alcance y sumamente intensas; mantienen unidos los núcleos atómicos.

Así pues, una explicación más convincente de por qué el taco de billar es el causante de que la bola (de billar) se mueva la proporciona la hipótesis de que a nivel microscópico serían las interacciones eléctrica y gravitatoria entre las moléculas constituyentes del taco y de la bola las que originaron el movimiento de ésta, ya que, al encontrarse inicialmente en reposo y por tener una menor inercia que el taco (sostenido por una persona), requería de la acción de un agente externo (que es el taco) para modificar su estado de movimiento; esto nos conduce a afirmar que efectivamente, ha habido una “causa” y un

---

<sup>59</sup> Lo mismo valdría para el caso relativista o cuántico. Sólo habría que hacer las adecuaciones pertinentes al contexto del problema.

“efecto” en el estudio de un evento, siendo la causa la interacción taco-bola, y el efecto, la respuesta de ésta al moverse. Este ejemplo muestra que en el estudio de un evento, el procedimiento explicativo básico apunta a buscar qué relaciones pueden establecerse entre las variables involucradas para discernir cuáles son causas y cuáles son efectos, sin pasar por alto que si por el momento no tenemos la posibilidad de dar una explicación cabal del por qué de la ocurrencia de las cosas, esto se debe más al desconocimiento que tenemos de ellas, o bien, porque no podemos establecer nuevas relaciones entre las variables.

De hecho, esta búsqueda de causas es el proceder natural dentro de la física. Incluso el mismo Heisenberg lo reconoce aunque, como Popper, consiente que la relación causal es, en principio, un baluarte metodológico del método científico; así, Heisenberg admite que el causalismo es una herramienta exitosa que nos ha llevado a la suposición de que existen leyes naturales brevemente expresadas en expresiones matemáticas, y que la relación causal se ha constituido en un elemento esencial de la ciencia; es así que externa que

Dos rasgos son por tanto característicos del nuevo método: el intento de diseñar experimentos nuevos y muy exactos que idealizan y aíslan la experiencia, y con ello crean realmente nuevos fenómenos; y la comparación de estos fenómenos con relaciones matemáticas que se denominan leyes de la naturaleza [...] Estas ideas son las formas arquetípicas puras que Platón llamara ideas, y para el hombre son inteligibles en calidad de relaciones matemáticas [...] Seguimos utilizando este método en virtud de su éxito. La base esencial del mismo estriba en repetir los experimentos. En último término, cabe ponerse de acuerdo sobre los resultados porque sabemos que experimentos realizados en las mismas condiciones conducen realmente a los mismos resultados. Lo cual no es en absoluto evidente. Sólo puede ser cierto si los sucesos obedecen estrictamente a una cadena causal, una sucesión de causas y efectos. Pero, andando el tiempo, y en vista de los triunfos cosechados, hemos aceptado este tipo de causalidad como uno de los principios fundamentales de la ciencia.<sup>60</sup>

Esta es, precisamente, una de las grandes virtudes que presenta la física, pues además de que siempre está intentando explicar el porqué del acontecer natural, busca hacerlo de la manera más rápida y sencilla, de tal suerte que las aproximaciones con que nos muestra la realidad sean lo mejor posible. Un buen ejemplo de esto que asevero es el manejo de las líneas de corriente (o de campo) para explicar el comportamiento de un fluido en movimiento pues, en vez de considerar la historia individual de cada partícula del fluido, se introducen simplificaciones teóricas que permiten predecir ágilmente, y sin

---

<sup>60</sup> Heisenberg, W. (1985); *Encuentros y conversaciones con Einstein y otros ensayos*; El Libro de Bolsillo. Alianza Editorial; España. Artículo: La tradición en la ciencia. pp. 15-16

pérdida de generalidad, el comportamiento del fluido en movimiento.<sup>61</sup> En este sentido, Matthews lo expresa claramente al asegurar que:

In the study of fluid flow under idealized stable conditions, two possible approaches are possible, associated respectively with the names of Euler and Lagrange. In the Eulerian method one looks at the system as a whole in terms of the density and current at fixed points in the space. Time does not appear explicitly since, although the fluid is flowing, the currents and densities at fixed points do not change with time in a steady situation. Alternatively, one may concentrate attention on a particular element of actual fluid, following its motion through the system. In the Lagrangian view, even in a steady state situation, time plays a crucial role, since the position of the test volume element is traced as a function of time.<sup>62</sup>

Es evidente entonces por qué muchas veces se manejan principios ideales que permiten visualizar y universalizar un evento dado, tal y como lo hace el Principio del Isocronismo Pendular (de Galileo), por mencionar un caso. Ahora bien, en aquellos campos donde aún no se tiene un conocimiento total del comportamiento o de la manera en que evoluciona un sistema, se vuelve obligatorio el manejo de la probabilidad y la estadística, pues éstas se introducen para dar una explicación más veraz de la posibilidad de ocurrencia de un fenómeno.

No hay que perder de vista la objeción de Hume respecto a la causalidad y la inducción; pero es evidente el gran apoyo que la estadística nos brinda para estudiar las regularidades naturales ya que, al estar físicamente imposibilitados para verificar si la relación de causalidad se cumple absolutamente para todos los eventos bajo estudio y postular con ello una ley natural inamovible,<sup>63</sup> sí podemos hacerlo continuamente con una muestra tan grande como queramos, observando continuamente la regularidad del fenómeno de tal suerte que podamos aplicar el principio de inducción, conscientes de que en caso de encontrar un evento que no se apegue a lo establecido por la ley, deberá

---

<sup>61</sup> Esta simplificación la propuso Euler. Lagrange proponía que para estudiar el movimiento de un fluido, era obligado conocer la historia de cada partícula, por lo que había que conocer su posición como función del tiempo; es decir, si se conocen las condiciones iniciales,  $x_0$ ,  $y_0$  y  $z_0$ , en  $t_0$  para cada partícula, entonces las respectivas coordenadas de la misma partícula al tiempo  $t_1 > t_0$  estarían dadas como:  $x=(x_0, y_0, z_0, t_0, t_1)$ ,  $y=(x_0, y_0, z_0, t_0, t_1)$ , y  $z=(x_0, y_0, z_0, t_0, t_1)$ , y así sucesivamente. Como se ve, esto es inviable de llevar a cabo, aunque nos daría el comportamiento real de las partículas en todo instante. Euler simplificó este trabajo, introduciendo simplificaciones teóricas al modelo, al considerarlo como un fluido ideal (sin viscosidad, sin rotaciones, incompresible, etc.). Esto le permite introducir el concepto de líneas de campo o líneas de corriente, donde se obliga a que una partícula se comporte en un punto dado, igual que su predecesora, y lo mismo hará su sucesora.

Como se ve, un gran paso simplificador y fácilmente deducible.

<sup>62</sup> Matthews, P. T.: (1968): *Introduction to Quantum Mechanics*; Third Ed.; Tata McGraw-Hill Publishing Co. Limited. New Delhi. 1974. p. 165.

<sup>63</sup> Cfr. Capítulo 1.

analizarse exhaustivamente para ver por qué no cumple con lo establecido por la teoría; ejemplos que no se apegaron a lo establecido por la teoría vigente y por la relación causal admitida en ese entonces son aquellos que dieron lugar al nacimiento de la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad en la física, o al origen de las especies de Darwin en la biología.

De acuerdo con lo observado en los fenómenos naturales estudiados, podemos asumir que, efectivamente, el proverbial causalismo de la física clásica se valida en prácticamente todos los casos del conjunto muestral –quizá después de imponer algunas restricciones que limitan el alcance de la teoría– existiendo además una correlación muy fuerte entre los estados secuenciales de un evento, estados que fungen como las variables causa y efecto; aun así, si consideramos la causa y el efecto como presuntas variables aleatorias –ambas con varianza positiva finita, y manteniendo bajo control las demás variables involucradas en la observación, pudiendo inclusive mantener constante la causa– encontramos una correlación fuerte entre las variables dado que el coeficiente de correlación  $\rho \in [-1,1]$ , cumpliendo lo establecido por la teoría estadística, en donde tenemos que una correlación perfecta de las variables se da cuando  $\rho$  es unitario; si recordamos, el coeficiente de correlación entre la causa y el efecto está dado por la expresión:

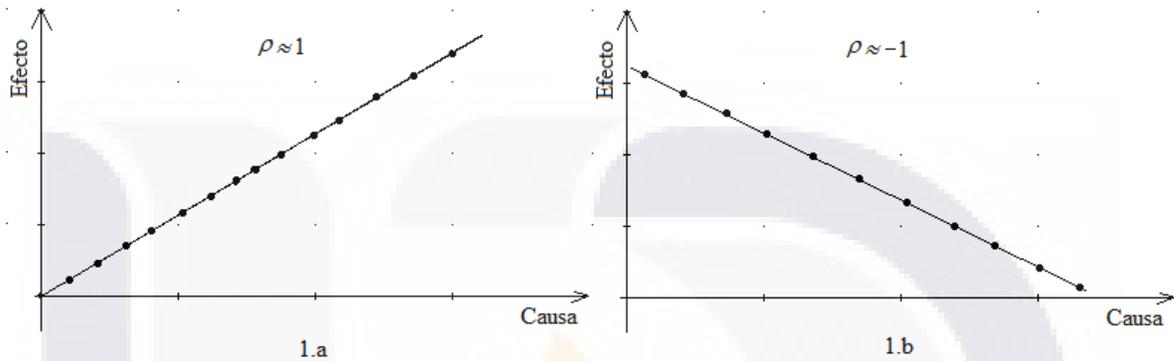
$$\rho = \frac{Cov(\text{causa}, \text{efecto})}{\sigma_{\text{causa}} \sigma_{\text{efecto}}} = \pm 1, \quad (4)$$

Por lo que podemos decir, sucintamente, que el coeficiente relacional  $\rho$  entre la causa y el efecto asume el papel de medida predictiva que muestra cómo se modifica el valor del efecto al modificar el valor de la causa. Ahora bien, la expresión (4) no indica que la causa sea el origen del efecto, sólo nos dice que siempre que cambia una variable, la otra también lo hace. Es por tal motivo que en las ciencias empíricas siempre se busca qué ocasionó el comportamiento que asume el sistema bajo estudio en el instante de la observación. La física clásica admite que si el factor de correlación está muy cerca del valor “perfecto” ( $|\rho| = 1$ )<sup>64</sup> en la evolución de un experimento, se tiene una relación de

---

<sup>64</sup> Estos valores se dan cuando se satisface que si:  $(\text{causa} - E[\text{causa}])/\sigma_{\text{causa}} = (\text{efecto} - E[\text{efecto}])/\sigma_{\text{efecto}}$ , luego  $\rho = 1$ ; y por otra parte:  $(\text{efecto} - E[\text{efecto}])/\sigma_{\text{efecto}} = -(\text{causa} - E[\text{causa}])/\sigma_{\text{causa}}$ , luego  $\rho = -1$ .

dependencia lineal entre las variables causa y efecto, indicándonos que si cambia la causa, se modifica el efecto (si  $\rho \rightarrow 1$ , al aumentar la causa, aumenta el efecto; por el contrario, si  $\rho \rightarrow -1$ , al aumentar la causa, el efecto disminuye). Gráficamente lo podemos ilustrar como en las figuras 1.a y 1.b.



**Figura 1.** Coeficiente de correlación entre la causa y el efecto. (a) correlación positiva. (b) correlación negativa. (Gráficos realizados en *Derive 5*).

Sin embargo, es de hacer notar que esta descripción de carácter estadístico corresponde a una muestra pues, como se indicó líneas arriba, es imposible efectuar la observación o estudio con todos los elementos del universo, siendo imposible asegurar, fehacientemente y de manera tajante, que el principio de causalidad se cumpla o no para todos los elementos del conjunto universal.

Pero como antes se mencionó, la correlación no asegura que la (aparente) causa sea el origen del efecto; para asegurar que la causa origina el efecto deberíamos contar con toda la información disponible de la totalidad de factores que pueden afectar el comportamiento del sistema, además de establecer las posibles correlaciones directas por pares de variables del sistema; es decir, sería deseable obtener relaciones entre pares de variables y los valores que toman, agrupándolas en conjuntos de variables con características similares para discriminar cómo inciden sobre el comportamiento del sistema. Esta congregación de variables de naturaleza semejante, al igual que aquéllas (variables) que se consideran imprescindibles para el funcionamiento del sistema (o aquéllas que lo afectan de manera directa, bien sea de forma continua o incidentalmente), permitirían clarificar las cosas, además de sistematizar la ocurrencia de los eventos y su posible evolución. Evidentemente, es una labor ingente, pero permitiría exhibir si la

relación causal vale o no. Un claro ejemplo de esto que digo podría ser la falla del músculo cardíaco (su ritmo) y su estrecha liga con el flujo sanguíneo que, a su vez, se relaciona con la oxigenación del cuerpo; así, si el músculo cardíaco falla, comienzan a detectarse problemas circulatorios que se traducen en la escasa oxigenación de las células; en este caso, hablaríamos de variables imprescindibles y sus posibles valores (músculo cardíaco sano/no sano y flujo sanguíneo adecuado/no adecuado) para el funcionamiento del sistema, por lo que la correlación entre tales variables, aparte de ser fuerte, es directa. Pero también se debe tener en cuenta que el flujo sanguíneo está relacionado, así sea indirectamente, con otros factores –incluso algunos de carácter eventual– que inciden directamente sobre el músculo cardíaco y pueden ocasionarle fallas, por ejemplo, atrofias o malformaciones genéticas, endurecimiento de las arterias, ‘soplos’, el fumar, la estabilidad emocional, el ejercicio, un susto, miedo excesivo, etc.–, por lo que se estaría considerando un anidamiento de variables para explicar el sano funcionamiento del sistema circulatorio; en términos funcionales, podríamos expresar si el flujo sanguíneo es adecuado o no, así:

Si

$f$  := flujo sanguíneo,

donde:

$x$  := funcionamiento del músculo cardíaco

entonces

$$f(x) = \begin{cases} \text{adecuado} \\ \text{no adecuado} \end{cases}, \quad (5)$$

donde los términos *adecuado* o *no adecuado* que aquí se emplean serían especificados por el experimentador dependiendo de los valores requeridos por su experimento (que podrían ser valores numéricos o nominales), y además, podríamos expresar el funcionamiento del músculo cardíaco como una función de múltiples varios factores, es decir

$$x = g(y_1, y_2, \dots, y_n)$$

con:

$y_1$  := atrofia o malformación genética,  $y_2$  := endurecimiento de las arterias, ...

$y_n :=$  miedo excesivo,

por lo que (5) resultaría ser

$$f(g(y_1, y_2, \dots, y_n)) = \begin{cases} \text{adecuado} \\ \text{no adecuado} \end{cases}$$

que exhibiría la dependencia del sistema bajo estudio de los diversos factores implicados en la ocurrencia del fenómeno, y que suministraría elementos más veraces acerca de la validez o no de una posible relación causal, aun cuando las ecuaciones involucradas sean muchas. Otra manera más simple de realizar el trabajo es suponer que un factor depende de otros factores, como por ejemplo:

$$y_1 := h(y_2, \dots, y_i), \quad \text{con } i = 2, 3, \dots, n$$

por lo que la expresión se reduciría, quedando como

$$f(g(h(y_2, \dots, y_n), y_2, \dots, y_n)) = \begin{cases} \text{adecuado} \\ \text{no adecuado} \end{cases}$$

o bien, podríamos dejar algunos factores constantes, por lo que la expresión se reduciría ostensiblemente.

El involucrar tantas variables conduce, de manera inmediata, a estudiar la correlación entre las variables directas, indirectas, incidentales, etc., para determinar cuál correlación de entre las variables es la que exhibe un mayor valor y establecer una comparación uno a uno con la mayor de las correlaciones de las demás variables. Es de esperarse que la mayor correlación influya más profundamente en el desarrollo del evento.

Esto debe tenerse en cuenta porque, como anteriormente se señaló, una correlación simple no es prueba de causalidad, aunque dé indicios de que sí puede afectar; por ejemplo, supongamos que siempre que un equipo de fútbol lleve a su lugar de juego un oso de peluche, se gane el juego. Es evidente que, aún cuando la correlación pueda ser fuerte, no existe nada que demuestre que el oso de peluche sea esencial para que el

equipo gane; en este caso, estaríamos hablando de una correlación entre (posibles) variables indirectas.

Así pues, podemos esgrimir el argumento de que la correlación entre las variables directas podría conducirnos a establecer una posible relación causa-efecto, aun cuando sea débil. Y esto debe ser claro puesto que la correlación entre variables puede deberse a un sinnúmero de factores, inclusive de carácter psicológico, como testimonia Woodward, al hablar de los condicionamientos clásico e instrumental.<sup>65</sup> Para que la relación causal quede fuertemente ligada a la correlación entre variables, requerimos hurgar en lo profundo del fenómeno bajo estudio, de tal suerte que la correlación nos conduzca a establecer las causas verdaderas del evento y matematizarse, tal y como propone Martínez, al decir

Ante el problema de inferir de los efectos a las causas, la metodología de la vera causa considera que es necesario que se cumpla una serie de requisitos para que podamos decir que estamos hablando de la causa verdadera [...] esto implica reconocer la importancia de reformular los efectos como parte de una estructura matemática que nos permita identificar las causas una vez que los efectos sean identificados.<sup>66</sup>

Pero la simple enumeración y obtención de las correlaciones de las posibles variables que afectan el objeto no es suficiente, por lo que también habría que estudiarse cuál es el efecto que producen –en el sistema bajo estudio– al irse combinando las variables por pares, por tríadas, y por  $n$ -adas, hasta concluir con el efecto combinado de la totalidad de las variables, sin excluir ninguna clase –aun aquellas tan disímiles y aparentemente improbables– y su actuar simultáneo, como por ejemplo, el caso del oso de peluche y la motivación que despierta en los jugadores por ganar el juego.

Lo anterior obliga a un análisis exhaustivo para determinar con claridad cómo afectan la totalidad de variables que aparecen, en primera instancia, como generadoras de un evento, comenzando por aquellas en las que la observación indica que son de la misma clase o que guardan ciertas particularidades afines entre sí, y delimitar el conjunto de circunstancias favorables que posibiliten la conjunción de las variables. Esto debe imponerse como primera condición de análisis para, a partir de ahí, proseguir con las demás variables y sus respectivas correlaciones, descartando las que son superficiales y nimias y privilegiando las que son trascendentales para el desarrollo del evento (el caso

---

<sup>65</sup> Woodward., *op. cit.*, p. 34.

<sup>66</sup> Martínez, S. (1997): *De los efectos a las causas*; Seminario de Problemas Científicos y Tecnológicos; UNAM. México, 1977. p. 168.

del oso de peluche y su influencia sobre el equipo exhibe esto, pues aun cuando el oso esté relacionado fuertemente, de manera psicológica, con la voluntad y aspiración de triunfo del equipo, no tiene injerencia con el hecho de ganar o no ganar el juego, pudiendo ser sustituido por algún otro amuleto en un momento determinado).

Debe explorarse también el hecho de que las variables que participen en la relación causal sean variables adyacentes (el miedo repentino y el infarto fulminante, por ejemplo) tanto en semejanza como en el tiempo. Por ejemplo, supongamos que en un edificio cualesquiera se posa sobre él, todos los días y a la misma hora una bandada no muy grande de palomas (cuyo peso no es excesivo para el edificio, para no causar daños estructurales; se está hablando entonces de dos variables relacionadas directamente: el peso –que es una fuerza– de la bandada de aves y su acción sobre la estructura del edificio, que involucra equilibrio de fuerzas). Supongamos entonces que algún día ocurriese un movimiento sísmico imperceptible para los sentidos humanos a la hora en que las palomas están sobre el edificio y éste se daña, estando a punto de caer; podría pensarse, *a priori*, que la bandada de palomas fue la causante del daño; sin embargo, sería más propio pensar que la variable que estaría relacionada directamente con el desequilibrio de las fuerzas –y el consecuente daño estructural del edificio– fue algo que actuó sobre el edificio (el sismo) y fue capaz de modificar las condiciones de equilibrio, ocasionando la ruptura o acrecentando la fatiga de los materiales. En este caso, estaríamos hablando de variables relacionadas entre sí que pueden aglutinarse por clases, además de las circunstancias favorecedoras que potencien el desarrollo de la interacción entre ellas (las variables), notándose un claro efecto de una sobre la otra. Asimismo, surge de manera inmediata la contigüidad temporal de las variables: el sismo antecede al desequilibrio del edificio, debiendo notarse que no hay intersección posible entre los tiempos en que se desenvuelve la causa y el tiempo en que se desarrolla el efecto; es decir, la intersección de los tiempos es vacía, considerando que el tiempo es monótonamente creciente.

De hecho, Popper, al analizar la causación, utiliza un argumento análogo al aquí expuesto, aunque en vez de utilizar el factor de correlación, emplea probabilidad condicional para referirse al cumplimiento de la relación causa-efecto en la física clásica, al decir que:

Volviendo ahora a la *causación*, haré un par de comentarios sobre el tema [...] El primero versa sobre la teoría determinista de la causación como empuje. Para Platón y Aristóteles, el movimiento es algo

que necesita explicación: se explica por la existencia de un motor. Tal idea queda clarificada y elaborada en la teoría cartesiana del mundo reloj. [...] El primer motor es la causa y *toda causación es empuje*. Newton seguía pensando en tales términos y, en consecuencia, trató de reducir toda fuerza atractiva a empuje [...] De modo que la teoría monística de la causación como empuje dio paso a una teoría del tipo *tirones-y-empujones*: escandalosa hasta para el mismo Newton, pero con todo muy intuitiva [...] La *causa* pasó a ser un estado de cosas que, con relación a una teoría aceptada, quedaba descrito por las condiciones iniciales. El *efecto* era el evento o estado de cosas que la teoría predeciría en presencia de las condiciones iniciales.

Debido a esta relación deductiva, es algo trivial que, en presencia de la teoría, la probabilidad del efecto sea 1:

$$p(\text{efecto, causa}) = 1$$

Esto, como digo, es trivial.<sup>67</sup>

Lo dicho por Popper es claro, aunque también debería aparecer en la expresión bajo qué condiciones –favorecedoras del evento– se tiene un efecto dada una causa, puesto que según lo manifestado por Hume, podría haber causas aparentes involucradas en tal expresión, o bien, podría haber causas ocultas que no se han tomado en cuenta. Por otra parte, en la expresión de probabilidad condicional surge la duda de si se puede manejar la simultaneidad entre la causa y el efecto, lo que nos conduce a argüir que el problema también se debe abordar temporalmente, y esto debido a que estamos hablando de una concatenación de sucesos, por lo que es obligatorio introducir el tiempo como referente, y es ahí donde radica el problema. Popper no lo maneja, pero al hablar de la evolución de un evento es imprescindible considerar el tiempo. Y al hacerlo, encontramos que la causa, de necesidad, precede al efecto –aunque parezca que pueden coexistir simultáneamente, en algunos casos–; es decir, cuando la causa existe en el tiempo, hay un efecto nonato, y cuando el efecto aparece, la causa ha desaparecido. Así pues, debería corregirse la expresión dada por Popper, quedando:  $p(\text{efecto} \cap (\text{causa} \cap \text{condiciones favorecedoras} \cap f(\text{tiempo del suceso})))$ , donde  $f(\text{tiempo del suceso})$  es una función temporal que dimensiona la ecuación; tal ecuación sería, en todo caso y de necesidad, mayor que la probabilidad de la intersección entre el efecto y la causa de Popper, para asegurar la ocurrencia. Hume me parece que se expresa de manera similar en lo relativo al introducir un parámetro como el tiempo, al expresar que:

Una causa es diferente de un signo, pues implica precedencia y contigüidad en el tiempo. Creo que es difícil asimilar una yuxtaposición causa-efecto al considerar en tiempo y lugar, tanto como una conjunción constante. Un signo nada es sino un efecto correlativo de la misma causa.<sup>68</sup>

---

<sup>67</sup> Popper., *Un mundo de propensiones...* pp. 44-45.

<sup>68</sup> Hume., *op. cit.*, p. 185, en el pie de página.

Así pues, me parece problemático sostener que causa y efecto coexisten simultáneamente, pues deben estar separadas entre sí por un tiempo pequeñísimo, pero no nulo, aunque también sea posible que esté dejándome llevar por una reflexión superflua y esté cayendo en lo que Hume asevera cuando dice que

Ya hemos observado que la naturaleza ha establecido conexiones entre determinadas ideas, y que tan pronto como una idea se presenta a nuestro pensamiento, introduce su idea correlativa y dirige nuestra atención hacia ella mediante un suave e imperceptible movimiento. Estos tres principios de conexión o asociación los hemos reducido a tres, a saber: *semejanza*, *contigüidad* y *causalidad*; que son los únicos lazos que unen nuestros pensamientos, produciendo este curso regular de reflexión o discurso que, en mayor o menor grado, se encuentra en todos los hombres,<sup>69</sup>

tesis que después vuelve a remarcar, al proponer que “la aparición de una causa siempre conduce a la mente, por una acostumbrada transición, a la idea del efecto. De esto también tenemos experiencia.”<sup>70</sup> Pero consciente de que, en primera instancia y dado que la contigüidad temporal no es simultaneidad, se sigue que la causa y el efecto no se superpondrían en modo alguno, por lo que la intersección causa-efecto es vacía, y su probabilidad sería nula, y en consecuencia, la probabilidad condicional sería cero, contrariando así lo aseverado por Popper; así pues, a la probabilidad condicional popperiana habría que adicionarle términos correctivos. Se manifiesta entonces que al enmarcar el evento dentro del devenir temporal, encontramos que, cuando el efecto está ocurriendo, la causa ha concluido su acción, por lo que la probabilidad de la causa es cero, ocasionando una indeterminación del cociente.<sup>71</sup> Así pues, creo que habría que analizar a fondo la expresión dada por el filósofo.

Por otra parte, y en un intento de emular a Popper, procedamos en forma análoga para intentar explicar la relación causa-efecto, utilizando para ello la regresión logística. Este tipo de regresión se aplica a variables que pueden depender, inclusive, de una multiplicidad de factores, pero que se apegan a la distribución binomial. Tal es, según creo, nuestro caso, pues deseamos observar la evolución de un evento dicotómico, teniendo como variables la causa y el efecto, que a su vez dependen (o pueden depender) de las circunstancias favorables o desfavorables inmiscuidas en el desarrollo

---

<sup>69</sup> *Ibid.*, p. 133.

<sup>70</sup> *Ibid.*, p. 183.

<sup>71</sup> En este caso me refiero a la definición de probabilidad condicional, dada por:  $P(B/A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)}$ , y  $P(A) > 0$ .

del suceso. Expresamos matemáticamente lo anterior de modo tal que visualizamos el efecto como una función de varias de variables (posiblemente causales), así:

$$e^y = e^{\beta_0 + \beta_1 x_{1,i} + \beta_2 x_{2,i} + \dots + \beta_k x_{k,i}} \quad (6)$$

donde

$$y = y(x) = \beta_0 + \beta_1 x_{1,i} + \dots + \beta_{k,i} \quad (7)$$

con  $y :=$  variable binaria que muestra la existencia, o ausencia, de una característica específica, es decir,  $y$  es el efecto de la causa (o causas).

Así pues, supongamos que recolectamos un conjunto de datos,  $n_{++}$  donde aparecen involucradas nuestras variables independientes: *causa* (de manera explícita) y el desconocimiento de si hay una causa (representada por:  $\sim$ causa) que produzcan el efecto, o bien, si no hay efecto observado (al que denotamos por:  $\sim$ efecto): así, obtenemos que después de  $n+1$  observaciones con la variable *causa*, se contabilizan  $n_{11}$  datos que producen el efecto esperado, y  $n_{12}$  datos donde se considera la causa pero no aparece el efecto. De la misma manera, nos percatamos que al no considerar la causa (variable:  $\sim$ causa) se cuenta con  $n_{21}$  datos que exhiben el efecto y que hay  $n_{22}$  datos donde no aparece el efecto, es decir, se tiene  $\sim$ efecto; el total de estos datos recolectados es  $n+2$ . La cantidad total de todas las observaciones con que se cuenta es entonces de:  $n_{++} = n_{1+} + n_{2+} = (n+1) + (n+2)$  observaciones. Concentrando esta información en una tabla de contingencia, tendremos la siguiente tabla de datos:

**Tabla I.** Datos requeridos para relacionar causa y efecto.

|                               | <b>efecto</b> | <b><math>\sim</math>efecto</b> | <b>total</b> |
|-------------------------------|---------------|--------------------------------|--------------|
| <b>causa</b>                  | $n_{11}$      | $n_{12}$                       | $n + 1$      |
| <b><math>\sim</math>causa</b> | $n_{21}$      | $n_{22}$                       | $n + 2$      |
| <b>Total</b>                  | $n_{1+}$      | $n_{2+}$                       | $n_{++}$     |

Al tomar los momios u odds, definiéndolos como:

$$odds(causa) = \frac{p(\acute{e}xito)}{p(fracaso)} = \frac{p(causa) = efecto}{p(\sim causa) = \sim efecto} = \frac{\frac{n_{11}}{n+1}}{\frac{n_{12}}{n+1}}$$

tendremos entonces que:

$$odds(causa) = \frac{n_{11}/n+1}{n_{12}/n+1} = \frac{n_{11}}{n_{12}}, \quad n_{12} \neq 0$$

y, análogamente:

$$odds(\sim causa) = \frac{n_{21}/n+2}{n_{22}/n+2} = \frac{n_{21}}{n_{22}}, \quad n_{22} \neq 0$$

por tanto, el odds ratio, o cociente de momios, resultara ser:

$$odds\ ratio(efecto) = odds\ ratio\left(\frac{causa}{\sim causa}\right) = \frac{\frac{n_{11}}{n_{12}}}{\frac{n_{21}}{n_{22}}}$$

que conduce a:

$$odds\ ratio(efecto) = odds\ ratio\left(\frac{causa}{\sim causa}\right) = \frac{n_{11}n_{22}}{n_{12}n_{21}}$$

si hacemos que

$$\begin{aligned} \theta &= \logito\left(\frac{(causa)}{(\sim causa)}\right) \\ &= \ln\left(odds\ ratio(efecto) = odds\ ratio\left(\frac{causa}{\sim causa}\right) = \frac{n_{11}n_{22}}{n_{12}n_{21}}\right) \end{aligned}$$

se encuentra una probabilidad relativa dada por

$$P = \frac{e^\theta}{1 + e^\theta}$$

donde se tiene un rango paramétrico dado por:

Si  $\theta = \begin{cases} \text{odds ratio (efecto)} \in [0, \infty), \text{ y } \text{odds ratio (efecto)} \neq 1, & \text{las variables son dependientes} \\ \text{odds ratio (efecto)} = 1, & \text{las variables son independientes} \end{cases}$

luego, resulta que  $\theta$  es un número real que está entre  $[0, \infty)$ ; <sup>72</sup> y dado que, generalmente se obtiene que:  $n_{11}n_{22} > n_{12}n_{21}$ , se encontraría que la probabilidad relativa es mayor para el evento que tiene una causa antecediendo a un efecto que para el evento que no tiene un antecedente causal; es decir, en los experimentos controlados, y considerando las regularidades estadísticas, se encuentra habitualmente que hay mayor cantidad de eventos exitosos al determinar el efecto si se considera la causa como la responsable de la ocurrencia del efecto, que aquellos eventos donde no hay causa explícita, por lo que las probabilidades quedarían como:

$$p(\text{causa}) > p(\sim\text{causa}) \text{ ----- (8)}$$

siendo claro que, aun considerando la regularidad estadística, es viable asumir que debe existir una causa para originar un evento, patentizando con ello que, al menos empíricamente, y con variables controladas, una causa induce, efectivamente, un efecto, llevándonos a colegir que la probabilidad de ocurrencia se ha vuelto, cuando  $n$  es muy grande (es decir, tomamos el  $\lim_{n \rightarrow \infty}$ ), una certeza, que es precisamente lo que hace la física clásica. <sup>73</sup>

Ahora bien, de todo lo anterior, se debe resaltar que lo que he hecho está, ciertamente, incompleto, pues se habla de una muestra. En este sentido, la virtud de la muestra se

---

<sup>72</sup> Note que  $\theta = 0$  si  $n_{11}n_{22} = n_{12}n_{21}$ , lo que indica que los datos recolectados están ‘equilibrados’; en este caso,  $P = \frac{1}{2}$ . Por otra parte, si  $n_{11}n_{22} \gg n_{12}n_{21}$ ,  $\theta \rightarrow \infty$ , lo que nos conduce a la regularidad estadística (de hecho, a la certeza, ya que  $P \rightarrow 1$ ); esto nos dice que en los datos recolectados aparecen más frecuentemente las efectos con causa ( $n_{11}$ ) que los eventos sin causa y sin efecto ( $n_{22}$ ), (o ambos), y aun así su producto es mayor que el producto de los datos de causa sin efecto ( $n_{12}$ ) y del efecto sin causa ( $n_{21}$ ). Ahora bien, si  $n_{11}n_{22} \ll n_{12}n_{21}$ , entonces  $P \rightarrow 0$ , lo que significa, o bien que casi no hay datos  $n_{11}$  ó datos  $n_{22}$  (o ambos), o bien, abundan los datos  $n_{12}$  ó los datos  $n_{21}$  (o ambos). Así, generalmente admitimos que se tiene una relación causal con el simple hecho que:  $\theta > 0$ , y  $\theta \neq 1$ , pues con ello  $P > \frac{1}{2}$ .

<sup>73</sup> De hecho, y tal como propone Hilbert: “*Todo conocimiento científico descansa en una evaluación razonable de la probabilidad, al concitar consenso y oposición.*” (Hilbert, D. (1993): *Fundamentos de las matemáticas*; Colección Mathema. Fac. de Ciencias. UNAM. 1993. p. 126). Y el determinismo en la física clásica, a fin de cuentas, se asume más por consenso que por existencia indubitable a lo largo y ancho de la teoría.

vuelve su mayor defecto, puesto que faltaría por evaluar, si se puede decir así, el resto de datos del universo, volviéndose entonces un acto de fe el decir si el determinismo existe o no. Y es que es pertinente señalar que, ante la fehaciente imposibilidad de inclinar la balanza hacia un lado u otro buscando demostrar si la naturaleza es determinista o no, sólo queda como último reducto la creencia personal de cómo es el mundo, pues parece ser que está más allá de las humanas posibilidades el certificar la validez o invalidez del determinismo en el medio natural.

## 2.5 ¿Por qué es determinista la mecánica clásica?

Así pues, y de lo anteriormente expuesto, es fácil comprender por qué la sistematización de las observaciones, la medición y un conjunto de conceptos teóricos claros y precisos, soportados por un esquema matemático de gran simplicidad y fortaleza, contribuyeron a instaurar una visión inmaculada de la relación causa-efecto gobernando el acontecer natural; con ello, el determinismo se instaló de manera inamovible no sólo en la física clásica, sino también en las demás ciencias, erigiéndose en el conocimiento *prima facie* por excelencia; Popper lo señala al expresar que

Una teoría física es determinista *prima facie* si, y sólo si, nos permite deducir, a partir de una descripción matemáticamente exacta del estado inicial de un sistema físico cerrado que se describe en términos de la teoría, la descripción, con cualquiera que sea el grado finito de precisión estipulado, del estado del sistema en cualquier instante dado del futuro. Esta definición no exige predicciones matemáticas exactas, aunque supone que las condiciones iniciales son, matemáticamente, absolutamente exactas. [...] Puede argüirse, incluso, que [...] deberíamos debilitar nuestra definición añadiendo las palabras «siempre que el sistema en cuestión no sea demasiado complejo».<sup>74</sup>

Y aún cuando Popper considera que el principio de causalidad es de carácter metafísico y es un baluarte metodológico, dada su potencial fortaleza explicativa, de la ciencia, admite que ésta se rehúse a abandonar la búsqueda de leyes basadas en la causalidad. Y es que es claro por qué la ciencia no puede abandonar la relación causal pues (a pesar de que se trata de un conjunto de leyes<sup>75</sup> y teorías) busca, entre otras

---

<sup>74</sup> Popper., *El universo abierto...* p. 54.

<sup>75</sup> A veces se dice que una ley física es, de suyo, un enunciado (o estructura semántica) que enuncia una verdad y que provee una relación causal; y se le critica por ser incapaz de clarificar totalmente los términos de la mencionada relación. Pero una ley busca dar explicaciones satisfactorias generales para eventos o sistemas semejantes, y en parte lo logra, aun haciéndolo mediante (exposiciones) instantáneas que muestran al evento bajo estudio en tiempos infinitesimales; es decir, una ley física desvela mediante argumentos que

muchas cosas, predecir (o retrodecir) eventos, y más aun, dar explicación del por qué suceden las cosas como lo hacen.

La causalidad (o el determinismo) se quedó, obligadamente, como parte esencial de la física clásica. Desde los antiguos estudiosos del acontecer natural apareció la relación causa-efecto como algo inmanente del mundo material, visión que subsistió hasta principios del siglo XVIII. Si hubo polémicas acerca de la validez y alcances de tal principio, fueron bastante pocas, siendo quizá la más significativa la que se dio entre Newton y Leibnitz acerca del carácter del espacio-tiempo; mientras que para Newton el tiempo era absoluto, para Leibnitz, en cambio, era relativo.<sup>76</sup> La relevancia de este hecho –lo absoluto o relativo del tiempo– es crucial para fortalecer o debilitar el determinismo. Si el referencial es absoluto, el determinismo es fuerte y demostrable bajo cualquier aspecto, sea lógico-formal, experimental, o de cualquier otra índole; con ello, la ontología del determinismo estaría fuera de toda duda, y la causalidad sería algo existente en sí y para sí dentro del mundo natural, lo que ocasionaría que las explicaciones físicas de los observadores deberían ser idénticas y consistentes, independientemente de su estado de movimiento. Si el referencial no es absoluto, el determinismo se debilita, pues el acaecer de los sucesos dependería del observador, pudiendo no coincidir en sus resultados. Martínez enfatiza esto al estudiar el determinismo y su posible impacto en la explicación de la teoría evolucionista de Darwin, al asegurar que

La discusión de fondo entre Leibnitz y Newton es acerca de la naturaleza del espacio tiempo, pero al mismo tiempo es acerca del estatus ontológico de las propiedades de los cuerpos. [...] En la física triunfó el esencialismo de Newton y lo hizo por buenas razones, pero algunas que Leibnitz tenía para oponerse a Newton siguen siendo válidas fuera de la física clásica. Hay aspectos del mundo que no pueden explicarse por medio de leyes mecanicistas deterministas, en particular el mundo vivo. [...] Durante todo el siglo XVII se pensaba que el conocimiento científico era absoluto o cierto, que tenía el estatus epistemológico del conocimiento obtenido por demostración en geometría. [...] El conocimiento obtenido de la experiencia es conocimiento de efectos, no de causas, pero son las causas las que tienen el poder explicativo, y pasar de los efectos a las causas no es conocimiento por demostración, *ergo*, no puede ser conocimiento científico.<sup>77</sup>

---

permiten visualizar –introduciendo quizá hipótesis e inferencias– la ocurrencia de un fenómeno manejado como si estuviese estático en el espacio y en el tiempo, o sea que de alguna manera desvela los acontecimientos por sus efectos, como si estuviesen dentro de una “caja negra”. Esto es bastante funcional –y a veces elegante– pues muchas veces permite manipular la relación causal más adecuadamente en términos de campos u otras cantidades físicas que en términos de fuerzas, a la vez que permite discriminar, y eliminar, posibles variables superfluas.

<sup>76</sup> Bronowski, J. (1962): *El ascenso del hombre*; Fondo Educativo Interamericano. México. 1962. p. 241.

<sup>77</sup> Martínez (1997)., *De los efectos a las causas...* p. 167.

Ahora bien, bajo los preceptos de la física clásica, se debe subrayar que el observador asume un papel secundario en la evolución de los eventos, dado que su interacción con el sistema físico es minúscula y no ocasiona prácticamente ninguna perturbación al sistema, cosa que no ocurre en la mecánica cuántica; es decir, toda observación puede llevarse a cualquier orden de magnitud, por pequeña que sea, pues no se considera ninguna cota inferior, lo que conlleva que podemos ir a los mundos micro o nanoscópicos tan lejos como queramos (de hecho, hasta llegar al cero absoluto, sea en distancia, tiempo, masa, etc.), que es lo que significa tomar el límite. Como ejemplo, podemos citar la definición de campo eléctrico, donde suponemos que podemos tomar una carga eléctrica puntual como testigo –no importa cuán pequeña sea– que nos indique cómo es la fuerza electrostática que actúa en determinada región del espacio –que debe ser homogéneo e isotrópico, para que la transmisión de la información sea uniforme–, matemáticamente lo expresamos como

$$\vec{E} = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{\vec{F}_E}{q_0} \dots\dots\dots (9)$$

Lo interesante aquí no es en sí lo que es el campo eléctrico, sino mostrar que en la mecánica clásica, la mayoría de las veces se satisface que: (i) existe total independencia entre el sujeto –como observador– y el objeto como observado, siendo “entes” perfectamente distinguibles y que guardan posiciones distintas en la diacronía del sistema; (ii) tal como lo muestra la expresión (9), es viable acceder –al menos en principio– a cantidades infinitesimales sin causar perturbaciones en el sistema bajo análisis (en este caso, el  $\lim_{q_0 \rightarrow 0}$ ). En caso de que exista alguna perturbación –que de necesidad debe de ser pequeña– ésta podría considerarse ignorable, o en su defecto, y en caso de estar siempre presente en la observación, como un error sistemático y sustraerse de cada lectura, sin afectar el resultado final del estudio. (iii) Asimismo, hablamos de sistema físicos bien localizados, tanto en el espacio como en el tiempo (en el caso de la expresión (9), hablamos de vectores, y éstos, para ser unívocos, dependen de un marco de referencia espacial, y si consideramos el continuo espacio-temporal de la relatividad, entonces deben estar ubicados tanto espacial como temporalmente); y (iv) hay continuidad del suceso, pues no existen saltos abruptos en su acontecer (en el ejemplo propuesto, es necesario aclarar que existe una indeterminación en las cargas eléctricas,

al considerarlas como las fuentes o sumideros del campo, es decir, las líneas de campo “nacen” en la carga  $+q$  y terminan en la carga  $-q$ ; fuera de ellas, todo es continuo).

Así pues, si consideramos el ejemplo anterior, podríamos decir que el sistema es, para todo propósito práctico, un sistema aislado (o cerrado),<sup>78</sup> aunque sepamos que en la realidad no hay un sistema perfectamente aislado. En el caso de que se desee efectuar una medición, se estipula que la interacción sistema-instrumento de medida (u observador) es despreciable, por lo que la interacción no ocasiona perturbaciones que modifiquen el estado del sistema; pero en todo caso, sería más apropiado hablar de sistemas “cuasi cerrados”, y ellos, admitimos, siguen cumpliendo el principio de causalidad. Así pues, y en resumidas cuentas, podemos decir que la relación causa-efecto en la física, y a nivel macroscópico, funciona, y tan bien lo ha hecho, que de ahí se buscó como propagarla a los demás tipos de conocimiento humano.

Pero en la mecánica cuántica la causalidad queda en entredicho, pues según sus postulados, y principalmente por los Principios de Incertidumbre de Heisenberg (PIH) y de Complementariedad de Bohr (PCB), el conocimiento simultáneo y pleno de las propiedades físicas de los objetos atómicos es imposible. Es por ello que Popper centra su atención en la nascente teoría y objeta sus postulados al argüir que si bien la mecánica cuántica exalta el indeterminismo, lo hace más por falta de comprensión de los fenómenos que por convicción, y que este indeterminismo es totalitario; llega incluso a afirmar que “la mayoría de los físicos se inclinan a considerar [...] un universo físico causalmente abierto (y, por tanto, indeterminista)”.<sup>79</sup> Este señalamiento es certero, aunque creo que no se propone enteramente así en la mecánica cuántica, pues un indeterminismo tan fuerte implicaría una contradicción interna debido a que el azar estaría siendo maximizado a niveles potencialmente riesgosos para la teoría, y finalmente, para la ciencia; y es que un indeterminismo de tal magnitud haría imposible cualquier predicción, cosa que evidentemente no hace la física cuántica. La mecánica cuántica es indeterminista en el sentido tradicional de la palabra, pues muestra que es imposible conocer completamente si un objeto atómico es una partícula o una onda, entes naturalmente irreconciliables, de acuerdo a la física clásica. Y es que experimentalmente es lo que ocurre: no sabemos qué son los objetos atómicos, si partículas u ondas. Por ejemplo, cuando un objeto atómico es detectado mediante algún dispositivo que

---

<sup>78</sup> Un sistema es cerrado cuando está aislado del resto del universo, es decir, cuando no hay interacción alguna con su entorno.

<sup>79</sup> Popper., *El universo abierto...* p. 146.

interactúa con él, asume un comportamiento de corpúsculo, es decir, es una partícula bien localizada en el referencial espacio-tiempo; en cambio, cuando está en movimiento, deja de estar localizada y asume comportamiento ondulatorio, presentando fenómenos de interferencia y/o difracción, característicos de las ondas. Precisamente fue este tipo de comportamiento anómalo o “indefinido” lo que condujo a los físicos a decir que la naturaleza del experimento es la que determina el comportamiento (de onda o partícula) del objeto atómico. Indudablemente que esto acarrea un sinfín de interrogantes, pero de ninguna manera conlleva un indeterminismo tan drástico que “supone la posibilidad de sucesos elementales fortuitos que son causalmente irreducibles”, como se queja Popper.<sup>80</sup> De hecho, él asegura que “sí creo que su indeterminismo es fundamentalmente correcto”,<sup>81</sup> aunque no lo avala en su totalidad. Por otra parte, quien esto escribe, piensa que es erróneo suponer que la mecánica cuántica pueda proponer un indeterminismo de tal envergadura, puesto que un indeterminismo así de rígido y fuerte derivaría, de manera inevitable, en el caos. Así, la mecánica cuántica debe ser, y es, determinista en cuanto que se apega a su propia normatividad, y es indeterminista sólo cuando se la compara con la física clásica.

Y es que la diferencia más contrastante entre las mecánicas cuántica y clásica, ambas exitosas (aunque la mecánica cuántica ha sido la teoría más exitosa de todos los tiempos), es que la física clásica es determinista por acepción, en primera instancia, y después, por la secuencialidad y continuidad propia de los eventos estudiados. Vemos que estas dos características de los fenómenos naturales macroscópicos son fácilmente perceptibles, inclusive por sentidos tan limitados como los nuestros, lo que nos permite estudiar la evolución de los sistemas sin problema alguno pues, para empezar, no se presenta ningún salto abrupto en la ocurrencia de los acontecimientos. La continuidad de los sucesos la apreciamos cotidianamente, y ello nos ha permitido asignar una trayectoria continua al evento;<sup>82</sup> dicha trayectoria consta del conjunto de puntos espaciales que a

---

<sup>80</sup> *Ibidem.*, p. 146.

<sup>81</sup> *Ibidem.*, 147.

<sup>82</sup> En matemáticas y en física se habla de la continuidad de una curva o trayectoria cuando ésta no presenta saltos. La definición técnica (en el caso de una variable; en el caso de varias variables, la definición es equivalente) sería :

**Definición:** Si  $a \in D(f)$ , se dice que  $f$  es **continua en  $a$**  si para toda vecindad  $V$  de  $f(a)$  existe una vecindad  $U$  (dependiendo de  $V$ ) de  $a$  tal que si  $x$  es cualquier elemento de  $U \cap D(f)$ , entonces  $f(x)$  es un elemento de  $V$ . Si  $A \subseteq D(f)$ , se dice que  $f$  es **continua en  $A$**  siempre que sea continua en todo punto de  $A$ .

O bien, se da el siguiente teorema, que podría haber servido como definición:

**Teorema:** Sea  $a$  un punto en el dominio  $D(f)$  de la función  $f$ . Las siguientes afirmaciones son equivalentes:

(i)  $f$  es continua en  $a$ .

cada tiempo  $t$  de un intervalo  $[t_0, t_n]$  le asocia uno, y sólo un punto en el espacio; y además, a dicho punto le asigna atributos físicos únicos; es decir, si  $\Gamma$  es la trayectoria del sistema, podemos decir entonces que  $\Gamma$  consiste en un conjunto de puntos a los que les asignamos un orden temporal monótonamente creciente, teniéndose entonces:  $\Gamma = \Gamma(t) \forall t \in [t_0, t_n]$ . El móvil podría incluso estar en reposo, pero aún así satisface la definición anterior. En la mecánica cuántica, sin embargo, se tienen saltos que “rompen” con la continuidad de la trayectoria; es más, ni siquiera podemos hablar con total certeza del concepto de trayectoria, puesto que no se ha observado que ésta exista, sino que hacemos alusión a ella, pero en el sentido clásico. Este sin duda es un problema que está en consonancia con la tesis kuhniana de la inconmesurabilidad, dado que los lenguajes de las físicas cuántica y clásica deben ser diferentes; efectivamente, en la teoría cuántica, Heisenberg es proclive a renombrar conceptos, sin embargo, Bohr asegura que la descripción cuántica debe hacerse empleando la terminología de la física clásica, por ser la que permite mejores imágenes mentales de los objetos bajo estudio pues

Como lo dice textualmente Bohr; “No obstante que los fenómenos trasciendan el alcance de la explicación de la física clásica, la explicación de todos los testimonios tiene que ser expresada en términos clásicos”.<sup>83</sup>

Retomando el tema de la trayectoria que siguen las partículas cuánticas, éstas en realidad son inexistentes o, en el mejor de los casos, podríamos hablar de una sucesión de puntos o trayectorias por trazos, que es lo que se observa en los rastros que dejan las partículas elementales en las cámaras de niebla o de burbujas. Esto nos conduce a decir que una de las principales diferencias entre las físicas clásica y cuántica es que, en aquella, los sistemas físicos guardan estados bien definidos y hay objetos distinguibles y separables; estados que se identifican y/o cuantifican fácilmente por algunas magnitudes físicas observables y medibles, como pueden ser: tiempo, posición, velocidad, fuerza,

---

(ii) Si  $\varepsilon > 0$ , existe un número  $\delta > 0$  tal que si  $x \in D(f)$  y  $\|x - a\| < \delta(\varepsilon)$ , entonces  $\|f(x) - f(a)\| < \varepsilon$ .

(iii) Si  $\{x_n\}$  es cualquier sucesión de elementos de  $D(f)$  que converge a  $a$ , entonces la sucesión  $\{f(x_n)\}$  converge a  $f(a)$ .

(Bartle, R. G. (1980): *Introducción al Análisis Matemático*; Ed. Limusa, S. A. de C. V. México, 1991. pp. 161-162).

<sup>83</sup> de Broglie, L. V. & Fok, V. A. (1987): *Examen de la Mecánica Cuántica*; Seminario de Problemas Científicos y Filosóficos; Colección: Suplementos 29; UNAM. México. pp. S<sub>29</sub> -246-247.

presión, volumen, temperatura, etc.,<sup>84</sup> mientras que en la mecánica cuántica, esto no es posible hacerlo.

Las variables observables nos indican la historia del sistema, permitiéndonos determinar unívocamente qué estado guarda (el sistema) cada instante; dichas variables (llamadas *variables de estado*) permiten seguir con mayor precisión el *itinerario* o *trayectoria* del sistema, independientemente del espacio coordinado en que se encuentre;<sup>85</sup> más aún, si tales variables se asumen como parámetros de un espacio coordinado (*espacio fase*) y además de mapear los datos se considera el tiempo, entonces es posible determinar con precisión la evolución del sistema.

Ahora bien, lo que realmente hacemos, sea explícita o implícitamente, es representar el comportamiento de un sistema como una función del tiempo, es decir:

si  $S :=$  comportamiento del sistema, entonces

$$S = S(t) \text{ ----- (10)}$$

donde  $t \in [t_o, t_n]$  .

Nítidamente se ve que la expresión (10) satisface todos los requerimientos para considerar que un sistema estudiado por la física clásica se comporta determinísticamente, pues contempla incluso la posible periodicidad de los eventos,<sup>86</sup> amén de permitir determinar la trayectoria del sistema, dado que tal expresión determina unívocamente el estado del sistema en los tiempos  $t_{i-1}$  y  $t_i$  (con  $t_{i-1} < t_i$  , y  $t_i \in [t_o, t_n]$ ), es decir, que el estado anterior determina el estado posterior del sistema físico. Vale decir que en sentido parecido se pronuncia Russell, al decir que:

A system I said to be ‘deterministic’ when, giving certain data,  $e_1, e_2, \dots, e_n$  at times  $t_1, t_2, \dots, t_n$  respectively, concerning this system, if  $E_t$  is the state of the system at any time  $t$ , there is a functional relation of the form

$$E_t = f(e_1, t_1, e_2, t_2 \dots e_n, t_n).$$

<sup>84</sup> Muchas de estas variables dependen de un marco de referencia establecido, y otras, por el contrario, conforman su propio referencial o espacio coordinado donde el tiempo no aparece como variable explícita.

<sup>85</sup> Por ejemplo, en termodinámica los espacios suelen tener las coordenadas macroscópicas:  $P, V, T, S, H$ , etc., denominadas coordenadas termodinámicas.

<sup>86</sup> Decimos que un movimiento es periódico cuando se repite a sí mismo después de un tiempo  $T$ , al que se denomina periodo; la función que lo describe es de la forma  $f(t) = f(t+T)$ , donde  $t$  es el tiempo.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

The system will be ‘deterministic throughout the given period’ if  $t$ , in the above formula, may be any time within that period...If the universe, as a whole, is such a system, determinism is true of the universe; if not, not. (1953, p. 398).<sup>87</sup>

Inclusive, podría aventurarse la hipótesis de que un sistema que se encuentra en la transición de un estado a otro y/o que presenta discontinuidades súbitas no necesariamente es indeterminista por no poder cuantificar qué ocurre durante la transición; lo que simplemente ocurre es que, como primer justificante, se desconoce cuál es el comportamiento real de las variables involucradas en el proceso, por lo que pueden omitirse o ignorarse momentáneamente tales puntos, y efectuar el estudio del comportamiento del sistema al ubicarnos en una vecindad, de radio infinitesimal, del punto donde se experimenta la discontinuidad,<sup>88</sup> subsistiendo el determinismo como tal, o en su defecto, teniéndose un determinismo por trazos, que se mantendrá hasta en tanto no se conozca cabalmente el porqué del comportamiento de las variables involucradas, o si hay variables que no se han considerado (variables ocultas). Esto claramente nos permite abordar el indeterminismo como un problema de ignorancia, más que como una suposición de posea una existencia tangible.

Igualmente, y como segundo rasgo distintivo de la física clásica, podemos señalar la objetividad del evento. Esto es un gran logro de la física, y se sustenta en que los fenómenos bajo estudio son “fácilmente estudiables” y sus resultados tienen la misma validez para todo aquél que observa el evento, independientemente del marco de referencia en el que se ubique,<sup>89</sup> sus características personales y sus creencias; es decir, al cotejar los resultados obtenidos de la observación, concluimos que éstos son aproximadamente los mismos para todos los observadores,<sup>90</sup> llegando entonces a un

---

<sup>87</sup> Earman., *A primer on...* pp. 10-11.

<sup>88</sup> De aquí el hecho de la analiticidad de las funciones.

<sup>89</sup> Quizá habría que exigir que sean observadores inerciales. En el caso de que sean observadores relativistas, habría que considerar sus velocidades relativas, teniendo en cuenta las variaciones que presentan la masa, las dimensiones de los objetos (o de los observadores), y el tiempo, pues según la teoría relativista, la simultaneidad no existe.

<sup>90</sup> A menos que cambie la masa del sistema, que sería el caso de los sistemas relativistas, donde según la transformación de Lorentz, se tiene que  $m = \gamma m_0$ . Habría que considerar aquí el problema reflexivo, es decir, si para un observador O en reposo la masa de otro observador O' que se mueve a velocidades cercanas a la de la luz (con  $v =$  constante) cambia por estar afectado por la velocidad, habría que cuestionar cómo vería el observador O' al observador “inmóvil” O, pues en realidad O' vería en movimiento a O con velocidad contraria a la que él tiene; por tanto, para O' es la masa de O la que ha cambiado. Habría que ver si el cambio en la masa es el mismo para ambos (aparentemente así ocurre, por el término cuadrático que afecta la velocidad, que hace desaparecer el signo negativo de  $-\vec{v}$ ). Habría que verlo en un laboratorio, pues si ocurre que ambos refieren la misma variación en la masa, entonces habría reflexión. Obviamente hay otros factores

acuerdo consensuado acerca de la validez de la teoría y los resultados que proporciona, y quedando a merced de quien quiera hacerse de ellos, al depositarlos en libros, revistas, etc. Popper admite la objetividad del conocimiento al decir que

Deseo distinguir ahora dos tipos de “conocimiento”: el subjetivo (que habría que llamar mejor conocimiento organísmico, ya que consiste en disposiciones de organismos) y el objetivo o conocimiento en sentido objetivo que está formado por el contenido lógico de nuestras teorías, conjeturas, suposiciones (y, si lo deseamos, por el contenido lógico de nuestro código genético).<sup>91</sup>

En suma, podemos decir que la física clásica es objetiva por considerar que los objetos gozan de la separabilidad, siendo independientes uno de otro y porque la presencia de un observador no modifica el estado ni la esencia de los objetos, lo que da como resultado una descripción ‘precisa’<sup>92</sup> –y que busca ser única– del sistema, independientemente de los atributos observacionales y las creencias propias del observador, además de que también está cimentada en un alto grado de verosimilitud que le otorgan no nada más la precisión de las mediciones, sino también el intersubjetivismo de la comunidad científica. Es así que la física clásica permanece vigente y sigue siendo aplicada en el mundo macroscópico, gracias a su elevado grado de certeza, belleza, simplicidad y armonía conceptual, pues la explicación que brinda de los fenómenos naturales, al igual que su capacidad predictiva, son de hecho, excelentes.

Asimismo, la física clásica es legal puesto que se sustenta en leyes demostrables y verificables –en contraposición con la mecánica cuántica, que a pesar de que también es legal, sus leyes son más consecuencias lógicas que no son demostrables, solamente verificables–. Pero en lo que hay coincidencia en ambas teorías es que sus leyes fundamentales tratan indirectamente sus objetos de estudio, al derivarse de abstracciones y de inferencias –muchas de ellas provenientes de la observación de los fenómenos bajo escrutinio experimental–, viéndose obligadas a adicionar elementos teóricos inobservables para dar consistencia a la teoría y contar así con una descripción fenomenológica más *ad hoc* con la realidad. Sin embargo, consentimos que las leyes permiten organizar y estructurar hipótesis que van cada vez más lejos de nuestro

---

que pueden influir, como la no invariancia de las magnitudes o la covariancia (Cfr. p. 22 de este capítulo), pero parece ser que todos estos factores serían reflexivos.

<sup>91</sup> Popper., *Conocimiento Objetivo...* p. 76.

<sup>92</sup> Lo entrecorillo porque me refiero al término en el sentido coloquial, es decir, algo es preciso cuando está clara y perfectamente definido, sin posibilidad de ambigüedad. Esto lo distingo de la precisión en la medida, que es la mínima lectura que se puede realizar con un instrumento de medida.

conocimiento verídico sensible –es decir, nos permiten especular científicamente–, además de que nos llevan a visualizar cómo pueden ser las interacciones entre los diversos sistemas naturales para, quizá, concluir que tales interacciones dependen de un sinfín de parámetros, por lo que enfocamos más nuestra atención en aquéllos más básicos o fundamentales, dado su carácter general: masa, carga eléctrica, cantidad de materia, etc.; y sobre todo, en aquellos fácilmente cuantificables: tiempo, posición, velocidad, volumen, y otras variables que introducen relaciones entre variables, como la cantidad de movimiento, la densidad, etc.

A pesar de todo, las leyes de la física clásica, si bien cuestionables en cuanto que deducciones y construcciones teóricas, siguen vigentes al ayudarnos a establecer relaciones, las más de ellas unívocas, donde resalta la relación causa-efecto, y todo ello pese a las simplificaciones propias que el modelaje teórico les impone; esto, sin embargo, no es óbice para la comprensión del acontecer natural, sino que más bien nos ayuda a desmenuzar lo que realmente ocurre, pues con unos cuantos principios elementales y básicos o con algunas cuantas idealizaciones simplificadoras –v. g.: partícula, sistema cerrado, centros de masas y de gravedad, etc.– abordamos problemas de gran complejidad, solucionándolos a veces por partes, y aplicando variados métodos de solución (problemas solucionados con ecuaciones diferenciales, con métodos estadísticos, con métodos numéricos, con simulación, etc., por citar algunos), para encontrar un resultado final satisfactorio que dé una explicación lógica y racional del porqué del comportamiento de los sistemas naturales.

Esto nos conduce entonces, inevitablemente, a estudiar el fenómeno, estableciendo con claridad quién es, o puede ser, el “efecto” y cuál es su (posible) dependencia o relación con las variables que puedan fungir como “causa” del evento. Para ello, comenzamos por “diseccionar” el suceso, estableciendo con propiedad nuestras (hipotéticamente) causas directas y causas indirectas, siendo aquéllas las que actúan de manera directa o sin intermediario, pudiendo tener incluso “contacto” con el sistema bajo observación; las causas indirectas, en cambio, serían aquéllas que no actúan directamente.

## 2.6 El indeterminismo de la Mecánica Cuántica

La diferencia entre las físicas clásica y cuántica es evidente: aquélla consiente que hay objetos perfectamente distinguibles y separables<sup>93</sup> en el mundo natural, y cada cuerpo es el que es y lo que es, y no podrá cambiar ese hecho hasta que un agente externo, sea físico o químico, lo modifique. La mecánica cuántica, por su parte, se encuentra sumida, visto desde la óptica filosófica, en un problema epistémico pues, de entrada, enfrenta objetos que no tienen –aparentemente y hasta este momento– una constitución física bien definida: no sabemos si los objetos atómicos son partículas u ondas. Kosso lo enuncia con toda propiedad al hablar de las características que distinguen a la física clásica de la física cuántica, cuando dice que

[...] In a classical system, there are no complementary properties. There is no principled uncertainty about the properties of things, and no values that cannot be simultaneously measured. Any uncertainties in our measurements of the aspects of nature are there because of human limitations. They are the results of our clumsiness or weakness of vision. Our machines are simply too imprecise because of technological problems or the pragmatic limitations of insufficient funding or not enough energy. In principle, that is, by classical laws of nature, all of these limitations could be made arbitrarily small. These classical uncertainties have no natural lower limit. Classical properties are always determinate and compatible. The world we experience of large, observable objects certainly seems to be a classical world. The mass, position, spin, orientation, and so on of the large scale things around us seem to have exact values and the value of one does not interfere with the value of another.<sup>94</sup>

Es por eso que, y en contraposición con la física clásica –que como hemos visto, es una teoría estructuralmente determinista, al tener fuertemente arraigada la relación causal en sus conceptos y leyes– en la mecánica cuántica parece ser que el determinismo (filosófico) es, hasta este momento y bajo una perspectiva “habitual o normal”, hecho a un lado para dar lugar a una teoría netamente probabilista que, aparentemente, se desliga de la causalidad, pues los sucesos parece que se tornan fundamentalmente azarosos. Sin embargo, debo admitir aquí que no concuerdo totalmente con esa tesis, pues creo que aún no se conocen totalmente muchas cosas de la naturaleza, y que faltan muchos (hasta hoy) enigmas teóricos y empíricos por clarificar a conciencia –los bosones de Higgs, o las

---

<sup>93</sup> Esto se aplica, por ejemplo, en la mecánica estadística, donde las partículas se suponen idénticas pero distinguibles y gozan de equiprobabilidad de ocurrencia, además, ante la imposibilidad de describir el comportamiento de cada entidad individualmente, se emplean valores promedio. Aún en este caso, se admite que funciona la relación causal; es más, la deducción de Planck del cuanto de acción está basada en estas ideas, pero la probabilidad que permea en su deducción es la teoría clásica de la probabilidad.

<sup>94</sup> Kosso, Peter (1998): *Appearance and Reality. An introduction to the Philosophy of Physics*; Oxford University Press. pp. 156-157.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

cuerdas, por mencionar los más sobresalientes en la física; asimismo, aún se está descubriendo nuevas variedades de vida, por ejemplo, los virus que viven en medios hostiles como arsénico, azufre, temperaturas elevadísimas, etc.–; claramente, tenemos potenciales variables ocultas que están saliendo a la luz y que modificarán, sin duda alguna, nuestra visión cosmogónica actual.

Por otra parte, también me parece inverosímil generar una teoría que no tenga como trasfondo último predecir y/o explicar el acontecer natural; es decir, no concibo una ciencia que se sustente totalmente en aspectos azarosos. Vamos, hasta las teorías del caos y de catástrofes intentan explicar el devenir natural con argumentos causales; por ello, me parece que la mecánica cuántica no es, de ninguna manera, una teoría indeterminista, y en todo caso, habría que aclarar, reitero, el significado de tal vocablo.

Si bien es cierto que muchos experimentos en los que aparecen involucradas las entidades microscópicas muestran que éstas exhiben rasgos que, además de ser de naturaleza distinta a la que se estudia en la teoría clásica y sus ecuaciones, definen un comportamiento único (la dualidad es uno de ellos), también es verdad que estas peculiaridades asociadas a una sola entidad no pueden ser descritas satisfactoriamente por la teoría cuántica, así sea la teoría que más éxitos ha alcanzado en este tema. Ha logrado explicar cosas que la teoría clásica no podía hacer; por ejemplo, la física clásica no responde convincentemente cuáles son las dimensiones espaciales de tales entidades, o porqué no es posible obtener iguales mediciones bajo circunstancias experimentales semejantes; en el mismo talante, arguye que una partícula tiene una trayectoria bien definida toda vez que se conocen las interacciones que experimenta y sus condiciones iniciales, regla que no obedecen los individuos subatómicos, para los que la trayectoria –vista desde el punto de vista clásico– es, como se ha enfatizado, prácticamente inexistente.

Podría pensarse entonces que el determinismo en la teoría cuántica se diluye al proponer supuestos e hipótesis (o postulados y leyes, respectivamente) estadístico-probabilísticas que surgen como una consecuencia lógica de evidencias experimentales (puesto que se carece, hasta hoy, de leyes más elementales o fundamentales que den fe de la conformación estructural del mundo subatómico), aunque me inclino a pensar que la teoría cuántica sigue siendo una teoría determinista, y lo es respecto a sus propios postulados, y ello debido a que es capaz de hacer predicciones exitosas –aun cuando sean de naturaleza estadística– cosa que sólo puede lograr un conjunto de conocimientos

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

con cierta estructura determinista. La mecánica cuántica es, según veo, análoga en muchos sentidos a la física clásica, y es también una teoría fenomenológica que tiene su origen en la observación y que intenta explicar los fenómenos del devenir atómico, así lo haga mediante el traslado de la conceptualización y terminología clásica a los objetos del micromundo, dado que no podemos ingresar directamente a su observación sin alterar su comportamiento. Lo anterior me lleva a asegurar que las leyes cuánticas –al igual que las leyes de la física clásica– gozan de universalidad, a pesar de residir más en criterios plausibles empíricamente que en demostraciones matemáticas rigurosas, tal y como ocurre con muchas leyes de la física clásica –por ejemplo, las leyes de Maxwell o muchas de la Termodinámica–.

Sin embargo, el determinismo estructural de la teoría cuántica es distinto al de la física clásica, al manejarse en ésta leyes y certezas que cuentan con una imbricación lógica que las vuelven una entidad unitaria en su totalidad, con interrelaciones teóricas entre sus distintos campos de conocimiento (mecánica y termodinámica, por ejemplo) que han exhibido un gran potencial predictivo y autogenerador de conocimiento, limitado sólo por las dimensiones a las que se enfocan. La teoría cuántica, en cambio, es una teoría sumamente poderosa que posee cimientos que, aun cuando provienen de evidencias experimentales, están armónica y lógicamente cohesionados, orientados hacia el estudio del microuniverso y que se ve obligada a adoptar posturas probabilistas. No obstante, la mecánica ondulatoria de Schrödinger suministra elementos suficientes como para permitir predecir dónde se encontrará la onda de materia conforme transcurre el tiempo, lo cual es una concepción determinista –incluso por la expresión que rige el comportamiento de la onda, que es una ecuación diferencial–; igualmente, la sola idea de una onda posee –de suyo– elementos deterministas, puesto que debe ser bien definida en la región en que se encuentra, a más de ser continua y uniforme y, por si fuese poco, tener una medida cuantificable (es decir, debe iniciar en una interacción y concluir en otra, puesto que existe de por medio una partícula en movimiento y de acuerdo a de de Broglie:  $\lambda=h/p$ ). Esto nos conduce a reinterpretar el indeterminismo de la teoría, y a qué está referido. Claramente, si el determinismo laplaciano consiste en determinar la evolución de un sistema empleando un modelo teórico que dé razón del comportamiento del sistema, entonces la física, sea clásica, cuántica o relativista, lo hacen indistintamente, constriñéndose solamente a las características de su objeto de estudio, y la evolución puede ser explicada en términos de certeza o de probabilidades.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Son estos pequeños indicios de ideas deterministas dentro de la teoría cuántica los que han reavivado la controversia filosófica acerca del auto-declarado indeterminismo de la teoría, pues sus detractores pretenden mostrar que existe la posibilidad de dar una explicación causal a muchos experimentos en los que se destaca la regularidad estadística. Uno de los trabajos más recientes pertenece a W. C. Salmon que al indagar en la fenomenología cuántica y percatarse de que en los sistemas subatómicos se encuentra implícito el problema de la dualidad onda-partícula, recurrió a la probabilidad y estadística buscando dar una descripción alternativa del comportamiento y evolución de tales sistemas; igualmente, Salmon concluyó también la obligatoriedad de las correlaciones estadísticas asociadas a los experimentos que se afanan en verificar –o refutar– la completud de la mecánica cuántica (es decir, experimentos del tipo EPR).

Salmon se aventura a introducir una posible estructura causal del mundo físico, introduciendo una red causal conformada por *procesos e interacciones causales*. Su propuesta pone en entredicho el requisito de alta probabilidad que aparece en el modelo estadístico-inductivo de Hempel debido a la ocurrencia –tal vez, incluso, reiterada– de fenómenos que tienen baja probabilidad de acontecer; de hecho, enuncia que “Si una y la misma distribución de probabilidad [...] provee la explicación de dos sucesos separados –uno con una probabilidad alta y otro con una probabilidad baja– las dos explicaciones son igualmente valiosas”.<sup>95</sup>

Salmon supone que los sucesos atómicos son eventos singulares, lo que le lleva a elaborar un patrón de explicación estadística donde evalúa qué factores tienen relevancia estadística, para así calcular distribuciones de probabilidad condicional. Claramente lo expone, al decir:

En circunstancias de un tipo específico C, un suceso de un tipo dado E algunas veces ocurre y algunas veces no. No hay, en principio, una manera de explicar por qué, en una ocasión dada, E ocurre en lugar de no E. Lo que es más, si en una ocasión C explica por qué E ocurre, entonces en otra ocasión el mismo género de circunstancias explica por qué E deja de ocurrir.<sup>96</sup>

Sin embargo, la relevancia estadística, por sí misma, carece de fortaleza explicativa, por lo que adicionalmente, Salmon introduce una condición de relevancia causal, por ser

---

<sup>95</sup> Rolleri, J. L. (2007); *La teoría de la Explicación Causal de Salmon y la Mecánica Cuántica*; Crítica, Revista Hispanopamericana de Filosofía, Vol. 39, No. 116; p. 4.

<sup>96</sup> *Ibid.*, p. 6.

ésta quien –según aduce– otorga valor explicativo. Tal es su modelo, conocido como *modelo mecánico causal estadístico*, y en él propone que

En el nivel más básico, es necesario, para los propósitos de la explicación, subsumir el suceso a explicar bajo un conjunto apropiado de relaciones estadísticas relevantes. En el segundo nivel, me parece, las relaciones estadísticas relevantes que se invocan en el primer nivel deben ser explicadas en términos de relaciones causales. La explicación, en esta concepción, no se completa hasta que se provean los componentes causales del segundo nivel.<sup>97</sup>

Podemos decir, abusando del lenguaje, que Salmon propone un modelo “indeterminista causal”, sustentado en el manejo de la probabilidad y la estadística al que, además, adiciona la correlación entre las variables implicadas en la observación del evento. Es manifiesto entonces que la explicación causalista de Salmon no se aleja mucho de los supuestos básicos de la mecánica cuántica, con la posible excepción de que desea exhibir que la causalidad es una propiedad inherente a los procesos individuales.

Podríamos decir brevemente que Salmon propone que los procesos causales no generan influencias causales, sino que sólo las transmiten, mediante lo que denomina bifurcaciones interactivas (que son quienes producen una modificación mutua de los procesos). Asimismo, las leyes de conservación de la física siguen vigentes en esta teoría causalista, y son ellas quienes determinan los intercambios entre los procesos.<sup>98</sup> La teoría causalista de Salmon, si bien es compatible con el indeterminismo cuántico, no se adecua a todos los procesos atómicos, sino que sólo es funcional para aquellos en los que no hay transformación de los elementos involucrados en el fenómeno bajo estudio; en caso de haber una transformación del sistema –una transmutación, por ejemplo–, los fenómenos no son explicados satisfactoriamente mediante el uso de la probabilidad, aun cuando sí lo sean en términos energéticos, mediante la aplicación de las leyes de conservación. En este último caso, cabe mencionar que, si bien se contemplan las posibilidades de que el sistema combinado de elementos discurra en el sentido de mayor probabilidad, podría ocurrir también que lo haga en el complementario, por lo que según la causalidad indeterminista, habría que indagar cómo es que se da en un sentido y no en el otro; para ello, propone “estabilizar el sistema” –en el sentido probabilístico– introduciendo la teoría

---

<sup>97</sup> *Ibid.*, p. 7.

<sup>98</sup> De hecho, el ejemplo predilecto de Salmon para aplicar su teoría es el efecto de dispersión de Compton, al que maneja probabilísticamente, considerando la independencia estadística de los procesos e introduciendo en el análisis la correlación (ver pp. 9-11, del artículo anteriormente citado).

bayesiana de las probabilidades (procesos markovianos, con condiciones deterministas), brindando así una posible descripción más verosímil.

Como se ve con la teoría de Salmon, ésta busca ser la respuesta de tipo causal a los eventos cuánticos. Sin embargo, es verdad que los esfuerzos realizados hasta este momento por generar una propuesta causal que esclarezca el comportamiento de los sistemas cuánticos no ha prosperado, pues siguen presentándose fenómenos difíciles de encuadrar en este tipo de explicaciones, siendo los más comunes los fenómenos donde aparece la transmutación de elementos y sobre todo, cuando se presentan fenómenos radiactivos de decaimiento natural. Allí es donde los modelos propuestos fallan o resultan incompletos, no nada más en la descripción del comportamiento del sistema sino, incluso, en la descripción del evento mismo debido, principalmente, a su elevada dinamicidad y complejidad.

Ahora bien, el tipo de modelos probabilísticos como el anteriormente planteado se han aplicado, también con éxito parcial, a experimentos relacionados con la completitud de la teoría cuántica (experimentos del tipo EPR) y sobre todo a experimentos donde se ven involucrados los fotones (o el spín) de los electrones.

En este tipo de situaciones, el estado inicial del sistema (por ejemplo, de partículas) en el momento de la interacción jugaría el papel de la causa indeterminista de efecto aleatorio en un tiempo posterior dado, puesto que las partículas adoptarían uno de los eigenvalores que los caracterizan (por ejemplo,  $s = +\frac{1}{2}$  ó  $s = -\frac{1}{2}$ ). Por tal motivo, se recurre a cuantificar el factor de correlación (o determinar cómo están correlacionados los valores resultantes) de las variables involucradas en el experimento, con la finalidad de verificar si el comportamiento de una de ellas determina el estado de la otra (que se supone que así sería si la correlación fuese “fuerte”). No obstante, y debido a la insatisfacción que deja usar correlaciones, aún se sigue buscando un método menos estadístico y más eficaz para explicar este tipo de fenomenología.

Pero existen problemas que no se han solventado y que siguen generando una serie de interrogantes de todo tipo, tanto físicos como filosóficos. Uno de ellos es el que se refiere a la descripción del comportamiento de una sola entidad, puesto que se suscita la interrogante de qué cosa es un objeto atómico: ¿es onda o es partícula?, además de que es prácticamente imposible, según uno de los postulados de la mecánica cuántica (que es PIH), efectuar una medición precisa que nos indique dónde se localiza la partícula y cuál es su cantidad de movimiento lineal. Esta inoperancia predictiva respecto a la localización

de un objeto atómico ha mostrado, al menos por el momento, que la teoría cuántica carece de argumentos contundentes para decidir si el azar es epistémico u ontológico, por lo que en primera instancia, la probabilidad viene a adoptar el rol de ser un elemento operativo indispensable para la descripción de los sucesos, cosa que no aparece –debido a la certeza ontológica– en la física clásica.

Podemos decir entonces que la probabilidad pulula por los supuestos cuánticos como un elemento fundamental teórico, y que proporciona explicaciones del devenir atómico basado en las posibilidades; sin embargo, es necesario hacer hincapié en que, no obstante el manejo probabilístico, la relación causal no necesariamente desaparece, sino que simplemente se difumina en posibilidades de ocurrencia, que no es más que una consecuencia lógica del indeterminismo epistémico propio de los objetos atómicos. También es palpable que al manejarse la probabilidad, el indeterminismo de los postulados de la teoría no puede proponer que todo sea contingente, pues eso implicaría una capacidad predictiva nula. Estoy convencido que la “incerteza” que se asienta en los postulados mecanocuánticos se refiere más al desconocimiento que tenemos de cómo son –o qué son– las criaturas atómicas (al no poder caracterizarlas nítidamente y encontrarnos “lentos de incertidumbre” a la hora de determinar sus magnitudes fundamentales necesarias para caracterizarlas como entidades físicas únicas, sean partículas u ondas) que a un “indeterminismo absoluto”, por lo que pienso que esto es a lo que se refieren los principios de Complementariedad de Bohr, el Principio de Incertidumbre de Heisenberg, y la función de estado  $\Psi$ . Si bien la mecánica cuántica le otorga existencia real a la probabilidad y más aún, la hace depender de la interpretación propia del observador, volviéndola subjetiva, hay quienes disienten con tal postura. Si bien Bohr y sus próselitos –los sustentantes de la declaración de Copenhague, u ortodoxos, como los denomina Popper– sostienen que los resultados de un experimento cualquiera dependen del sujeto que “observa el evento”, pues éste interfiere con la observación, existe la contrapropuesta de Einstein, que se sitúa a la cabeza del grupo inconforme con esta visión incierta y subjetivista, asegurando que la probabilidad debe ser llevada en el sentido clásico, es decir, *aprorísticamente*.

Ahora bien, es verdad que la mecánica cuántica parece sentar las bases para una teoría más acorde con las evidencias experimentales y que rehúsa abrazar la postura del realismo, al cuestionar el conocimiento verdadero ya no sólo de los objetos subatómicos, sino también el que tenemos de la realidad, pues ni siquiera sabemos cómo es ésta, ni

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

cuáles son sus límites (en caso de que existan), además de cuestionar si la realidad es independiente del observador, puesto que éste es quien interactúa con ella, interviniéndola constantemente. Con esto, la teoría cuántica toma distancia de las posturas convencionales que imponen determinada finalidad a la ciencia, y lo hace buscando solamente la concordancia entre sus predicciones y las evidencias experimentales, anteponiendo a veces los criterios de verosimilitud y funcionalidad sobre los de la conceptualización física y la comprensión, privilegiando la matematicidad que subyace en sus desarrollos teóricos por sobre la explicación, volviéndose entonces una teoría abstracta (y compleja), que fue lo que causó la queja de Einstein, de Broglie y el mismo Schrödinger. Para los creadores de la teoría cuántica, exceptuando a los 'disidentes', la teoría cuántica busca también desproveerse de los argumentos metafísicos, así sea privilegiando la coherencia lógico-matemático sobre el desarrollo del concepto y enfocándose a resolver problemas que muestren su capacidad predictiva y donde quede de manifiesto su elevado grado de precisión en sus predicciones.

Por otra parte, debemos ser conscientes que la mecánica cuántica no puede apegarse a la ortodoxia clásica, pues de entrada, enfrenta un mundo desconocido que solamente podemos inferir a través de los experimentos y, aunque siempre aparece la incertidumbre asociada a la medición igual que en la teoría clásica, hasta este momento admitimos que dicha incertidumbre no es controlable –cosa que sí ocurre clásicamente– y varía inesperadamente por el simple hecho de observar los objetos atómicos. Pero ¿cómo observar un electrón sin luz? Esto, interpretado en el sentido clásico, es lo que ha llevado a decir que en la teoría cuántica subyace un indeterminismo real y que por eso las leyes se tornan probabilísticas, lo que nos conduce a que los (posibles) eventos predichos no se produzcan necesariamente, sino que sólo existe una enorme posibilidad de que ocurran, y en tanto sea mayor la probabilidad de ocurrencia, mayor posibilidad hay de que acontezcan. Sin embargo, y tal como lo expresé previamente, creo que la teoría es determinista respecto a sus propios postulados, y la verificación de éstos es la mejor prueba de ello.

Otro problema que se presenta en la mecánica cuántica es la tajante manifestación acerca de la completud de la teoría; sin embargo, pienso que tal aserto es bastante aventurado, y es que ninguna teoría –en tanto que creación humana– puede ser completa, pues siempre estará expuesta a los dictados de la naturaleza. La completud de la mecánica cuántica me parece que es, bajo las premisas mismas de la teoría, una

contradicción, puesto que si no se conoce cabalmente cómo es la naturaleza de los objetos atómicos, no se puede hablar de que ya no hay más por hacer, puesto que una obligación moral de la teoría es buscar cómo explicar tal desconocimiento, y entonces, no puede ser completa bajo ningún punto de vista. Más bien dicha completud está ligada al problema epistémico relativo a la verdadera naturaleza de los objetos atómicos. Y es que estamos acostumbrados, por experiencia, a tratar con ondas o partículas por separado, gozando ambos conceptos de atributos y propiedades bien definidos, y comportándose de manera distinta en su interacción con agentes externos: la partícula siendo un objeto puntual, pero quedando bien delimitado su sitio en el espacio y en el tiempo, y la onda, existiendo simultáneamente a lo largo y ancho del espacio y del tiempo ¿Cómo hablar entonces de conceptos físicos tan disímiles conjuntados en una sola entidad que asume distintos comportamientos, como si tal ente físico conociera de antemano la situación en que se le va a colocar, exigiéndose que asuma una de sus caracterizaciones para ser observada? Tal sugerencia parece inverosímil, y tal hecho fue lo que objetó Einstein, pues para él los objetos físicos y sus propiedades están perfectamente definidos –y separados– en el continuo espacio-tiempo. Es por tal motivo que se opone a que la física cuántica sea completa, pues la explicación dada por el principio de complementariedad de Bohr es una explicación momentánea que aún debe enfrentar nuevos retos para poder conducir a mejoras conceptuales que puedan dar una explicación más congruente con la realidad.

Por mi parte, pienso que la mecánica cuántica no es, o no debe ser, solamente una teoría utilitaria y reduccionista o una simple relatora de hechos que se contenta con verificaciones experimentales, sino que tiende a ser una teoría explicativa que admite la realidad de los sucesos cuánticos, independientemente de si hay o no un observador, y es por ello que busca dar razón de las cosas, así sea basándose en premisas y preceptos de carácter probabilista; es cierto que como toda teoría científica, se asume inicialmente como un instrumento que proporciona un panorama descriptivo general de un grupo particular de sucesos, más como buena teoría física, no se resigna a quedarse en la descripción superficial sino que busca ahondar en el por qué las cosas del mundo cuántico se comportan como lo hacen, aunque a veces sólo se quede en los cómo de tal comportamiento; pero es palpable que la teoría propone alternativas lógicas y satisfactorias que expliquen, así sea sólo matemáticamente, la ocurrencia de los eventos cuánticos. Para ello, propone hipótesis que se confrontan con los datos experimentales y

que van ampliando nuestro horizonte gnoseológico del mundo cuántico, al que dotan de características propias y lo pueblan de una prole que yace en un nivel físico y conceptual cada vez más profundo y que de algún modo se ha constituido en parte medular de la ciencia y del mundo natural. Dichas presunciones teóricas, una vez que se han cotejado exitosamente con los datos experimentales, se asumen como parte esencial de la teoría, elevándolas a rango de ley empírica; cabe decir que esto no es muy distinto de lo que ha ocurrido en la teoría clásica (como ejemplo, se puede citar las diferentes hipótesis que surgieron alrededor del calor y su transferencia). En lo que sí se puede señalar una diferencia sustancial entre ambas teorías es que mientras la física clásica se asume abierta, y dispuesta, a incorporar nuevas hipótesis que mantengan empatía con las leyes vigentes –llegando incluso a deducirse de éstas– para explicar nuevos fenómenos, la teoría cuántica parece rehusarse a hacerlo. Sin embargo, habría que ver por qué de tal rechazo; muchos apologistas de la teoría cuántica ortodoxa esgrimen el argumento de que ésta es completa, y que hasta este momento no ha sido necesario, a pesar de ser producto del quehacer humano, de experimentar ajustes y mejoras. Sin embargo, para quien esto escribe, creo que ninguna teoría puede presumirse como finalmente válida e inmodificable, pues la naturaleza suele ser un ente cambiante. La teoría cuántica no puede ser sólo un instrumento semejante a un bisturí, pues si bien es cierto que con este utensilio podemos abrir un cuerpo, remover órganos y ver su interior para ver cómo está constituido, también es verdad que (el bisturí) no nos dice cómo están entrelazados los órganos, ni cuál es la función que desarrollan, ni por qué funcionan así y no de otro modo; naturalmente, esto lo proporcionaría una teoría médica bien estructurada. Tal es la diferencia entre el uso de un instrumento y de una teoría. Es pertinente, en este sentido, la llamada de atención de de la Peña, al señalar que

El simple hecho de que exista tan amplia diversidad de opiniones respecto del significado físico del formalismo de la mecánica cuántica, y que ellas coexistan y sigan generando constantes discusiones, tanto físicas como filosóficas, demuestra que el problema de fijar el contenido físico adecuado al formalismo –el que casi nadie discute en sus aspectos fundamentales– no está aún resuelto y demanda, por lo tanto, más investigación seria y dedicada, como cualquier otro problema científico abierto e importante. Ninguna interpretación hasta hoy propuesta está libre de dificultades, aunque los problemas que cada una plantea legítimamente son diferentes. [...] Desgraciadamente, todos estos esfuerzos no han producido hasta la fecha una alternativa a la teoría ortodoxa tan acabada como ésta, por lo que el problema básico de elaborar una teoría cuántica que sea estadística, causal y expresada en términos objetivos y realistas sigue abierto.<sup>99</sup>

---

<sup>99</sup> de la Peña., *Introducción a la...*, pp.882-884.

## 2.7 Los Objetos atómicos y el PIH

Ahora bien, el problema central de la teoría cuántica es que no conocemos cómo son en realidad los objetos atómicos, si ondas o partículas, a pesar de que se admite su naturaleza dual. Pero ¿cómo es que se ha llegado a tales ideas, es decir, porqué se asegura que los objetos atómicos asumen comportamiento corpuscular u ondulatorio? La respuesta es, como antes dije, que debido a la experiencia, atribuimos características macroscópicas corpusculares u ondulatorias a las criaturas atómicas. Dicho más simple: los conceptos de partícula y onda que aplicamos al mundo cuántico –sobre todo el primero– provienen de extrapolaciones de nuestras experiencias de la realidad cotidiana, aunque, aun así, habría qué decidir cuál es el contexto bajo el que pueden aplicarse, tal como lo hacemos en la física clásica. Por ejemplo, en la física clásica, podemos considerar que una estrella es una partícula, y es por tal abstracción que describimos su trayectoria aplicando la mecánica newtoniana (el mismo caso es válido para la teoría relativista, pero a grandes velocidades); se infiere rápidamente que la estrella puede ser tratada como partícula sólo cuando comparamos sus dimensiones espaciales con las distancias que nos separan de ella, siendo aquéllas mucho menores que éstas; en el caso de la Luna, por ejemplo, no sería conveniente sostener la idea de un objeto puntual dado que está muy cerca de nosotros y ya presenta otras características.

Un caso similar se presenta con la idea de onda que manejamos clásicamente, debido a que dicho concepto surge de manera inmediata por las experiencias visuales que tenemos al tratar con ondas mecánicas en cuerdas, agua, o en resortes, e igualmente, con las ondas sonoras. No obstante, hemos trasladado este concepto clásico al submundo atómico, aunque en el caso cuántico ya tengamos más restricciones para hablar propiamente de una onda, pues no sabemos si, efectivamente, hay ondas a nivel molecular. Mantenemos vigente la idea ondulatoria en el micromundo porque suponemos que, al considerar los promedios del movimiento grupal de las moléculas –estimando que contamos con un número significativo de estas entidades– se tienen interferencias constructivas que producen una onda.

De lo anterior, se evidencia que los conceptos de partícula y onda no son más que ideas simplificadoras que posibilitan la comprensión y solución de un problema al reducir la complejidad de los cálculos involucrados en el modelaje matemático. Sin embargo, ha sido esta extrapolación de conceptos propios de la física clásica a la teoría cuántica lo que ha causado conflictos físicos y filosóficos, pues al desconocer cómo son en realidad las

criaturas cuánticas, les hemos dotado de atributos que no sabemos si en realidad poseen, lo que nos ha conducido –inevitablemente, y debido a nuestros afanes predictivos y de comprensión– a crear modelos abstractos con un elevado grado de complejidad que ponen fuera de nuestro alcance conceptual e intuitivo el comportamiento de los objetos atómicos, llegando a concluir paradojas tales como que los objetos cuánticos deben tener voluntad propia para determinar qué tipo de ente clásico desean ser, si partícula u onda. Pero esto socava el realismo y el objetivismo tradicionales, puesto que ignoramos si el objeto atómico posee una identidad material propia independiente del observador y si verdaderamente su comportamiento depende de sí mismo o se ve afectado por el observador, que perturba y modifica las características físicas de la criatura. Visto de esta manera, ha sido palpable la poca funcionalidad de transferir experiencias y evidencias empíricas macroscópicas (relativas a los comportamientos corpuscular u ondulatorio) a los objetos atómicos con fines explicativos.

Igualmente debe considerarse el caso de la trayectoria; en la física clásica ya dijimos que se tienen trayectorias bien definidas, pero en la mecánica cuántica bien a bien no sabemos si hay trayectorias asociadas al movimiento de los objetos atómicos, puesto que hay experimentos que nos llevan a pensar en una naturaleza discreta, es decir, que la continuidad clásica se ve interrumpida, asumiéndose entonces que una trayectoria no es más que una sucesión de puntos muy cercanos entre sí. Esto hace muy difícil establecer una función que sea válida para el movimiento (aunque falta ver cómo evolucionan tanto la matemática como la computación cuántica en este sentido). En este instante, esto es excesivamente difícil. Es por esto que el desarrollo de las ideas cuánticas ha llevado a buscar definir con claridad si nuestro mundo es de naturaleza continua o discreta. Inclusive, podríamos objetar que la teoría sí maneja la continuidad pues una onda debe, por obligación, ser continua, y dado que en la teoría aparece la ecuación de Schrödinger, entonces hay continuidad, aunque hay que mantener presente dicha ecuación pues, a pesar de manejar el concepto de onda, ésta es (una onda) *sui generis*, por ser una onda que no es observable (ni demostrable), y que proviene de un postulado; es menester señalar que a esta ecuación de onda se le hizo cumplir ciertos requisitos de plausibilidad,<sup>100</sup> ante la imposibilidad de deducirla de un cuerpo teórico más elemental, o ante imposibilidad física de encontrar la onda como una onda mecánica o electromagnética. Más bien, dicha ecuación es una idea que se retoma de la física clásica

---

<sup>100</sup> Esto se verá en capítulos posteriores con mayor detalle.

para aplicarse a un objeto atómico, sólo que a la “onda de materia” que describe, se le asignan atributos especiales: está asociada a la probabilidad, se propaga en el espacio de configuraciones y tiene asociada una partícula, pero no es más que una onda abstracta que no se sabe si es continua o no; el modelo clásico asegura que es continua, pero en realidad no lo sabemos. El problema es complicado entonces, pues nos encontramos en la disyuntiva de si la naturaleza es continua, de acuerdo a la visión de la física clásica, o puede ser discreta, de lo que se puede deducir de la mecánica cuántica, pues:

En cualquier caso, nos ha quedado la idea de que quizá haya realmente una discretización tal en la naturaleza, pese al hecho de que la mecánica cuántica, en su formulación estándar, no implica esto ni mucho menos. Por ejemplo, el gran físico cuántico Erwin Schrödinger fue uno de los primeros en sugerir que podría ser necesario un cambio hacia alguna forma de discretización espacial fundamental [...] También Einstein sugirió, en sus últimas palabras publicadas, que una teoría («algebraica») basada en la discretización podía ser el camino hacia la física futura.<sup>101</sup>

Así, en este momento, estamos en una encrucijada y esperando ver que resuelve la computación cuántica.

## 2.8 Conclusiones

En este capítulo he expuesto someramente por qué la causalidad y el determinismo imperan a lo largo y ancho de la física clásica. Hemos visto que el determinismo tiene como base la experiencia proveniente de un mundo macroscópico y se propone incluso, tal y como Popper señala, como recurso metodológico en la generación de modelos y teorías. Una de las condiciones que el determinismo toma como propias es la continuidad de los eventos, y en caso de que no haya continuidad, al menos se puede desear que el posible curso o trayectoria de la discretitud de los eventos se mantenga, es decir, que no haya cambios aleatorios de un punto a otro del espacio –en este caso, la analogía adecuada sería la de ver circulando un tren por las vías. Si constantemente vemos al tren, diremos que su marcha es continua; supongamos ahora que el tren pasa por un túnel que atraviesa una montaña. Es claro que dejamos de verlo, pero estamos seguros que aparecerá por la misma vía del otro lado del obstáculo, pues ahí está la vía, siendo

---

<sup>101</sup> Penrose, R. (2004): *El camino a la realidad. Una guía completa de las leyes del universo*; Random House Mondadori, S. A. México, 2007. pp. 119-120.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

imposible que lo encontremos en un lugar distante de tal punto si no hay raíles por donde pueda circular. En este caso, no hubo cambios espaciales de un punto a otro, por lo que podemos suponer que hay continuidad en la sucesión de eventos discretos—. Esto permite predecir y explicar, en términos funcionales, la evolución de los eventos; es por eso que la mayoría de modelos explicativos clásicos se fundamentan en las ecuaciones diferenciales. Si la continuidad espacial en la sucesión de eventos se rompe, entonces estamos en problemas, porque no sabemos bien cómo se comportará el sistema, es decir, tendríamos el equivalente a ver al tren en cualesquier punto donde hubiese vías por las que pueda circular, aun cuando esté muy distante del punto donde dejamos de verlo, sin saber cómo llegó allí.

Asimismo, y considerando la definición de determinismo que he osado proponer, es claro entonces que la teoría cuántica no es una teoría determinista, pues sólo satisface parcialmente la mencionada definición; digo que es una teoría no determinista a pesar de que utiliza el tiempo como un elemento indispensable —y ordenado— en las observaciones y, aunque no se conocen con precisión, existen eventos antecedentes que pueden fungir como causales de otros sucesos consecuentes. Haciendo caso omiso del referencial inercial que considero necesario introducir en la definición, y dado que el Principio de Incertidumbre de Heisenberg, por el hecho de no requerir de un referencial determinado, resulta ser no determinista, resulta claro entonces que la mecánica cuántica es también no determinista (en el sentido de la definición, y lo mismo en el sentido clásico) aunque para mi gusto, es una teoría determinista en sí misma, aunque sea parcialmente, puesto que en la ecuación de Schrödinger aparecen el determinismo y la continuidad.

Por otra parte, el desarrollo probabilista que aquí se ha presentado muestra que, si bien la relación causal no se manifiesta abierta y contundentemente ligada a la ocurrencia del evento al que llamamos efecto, tampoco nos indica que se pueda descartar completamente, impidiendo con ello clarificar si existe en verdad una relación causa-efecto presente en la naturaleza. Dicho de otra manera, la suposición de que la relación causal vale creo que se mantiene vigente, así sea con debilidad. He aventurado aquí la suposición de que la causalidad se debe a las fuerzas, que serían la mínima cantidad medible de una interacción, y esto vale en cualquier ámbito. Si bien la teoría cuántica no utiliza explícitamente la fuerza, no la desecha, pues en términos de ella se pueden expresar la cantidad de movimiento y la energía. Otra opción quizá más complicada de visualizar es la conjetura de que la causalidad bien podría deberse a la configuración que

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

a niveles atómicos el espacio pueda tomar; el grado de intensidad con que la interacción se manifieste entre los eventos antecedente y subsecuente dependerá del grado de "lisitud", "rugosidad" o compacidad que el espacio pueda asumir, pues esto afectaría el comportamiento de los objetos que en él se encuentren. Ello repercutiría en el grado de estabilidad o inestabilidad que un sistema adquiriera (inclusive permitiría visualizar las órbitas estables –del tipo de un espacio fase– en un evento altamente dinámico) y que se presentaría como un suceso que, con causa aparente o sin ella, modifica el estado actual del sistema. Esto restituiría la capacidad explicativa de la causalidad.

Sin embargo, al no tener elementos con que probar la conjetura anterior, debo resignarme a lo que la mecánica cuántica propone, y ella rompe con la estructura explicativa de la física clásica, puesto que no existe una trayectoria bien definida, lo que hace imposible emitir una predicción certera, dejándonos como única oportunidad la probabilidad como herramienta predictiva. Así pues, queda de manifiesto que el determinismo en el sentido laplaciano se viene abajo en, y por la mecánica cuántica, aunque habría que indagar, insisto, exhaustivamente para ver si ocurre lo mismo con la relación causal, pues considero que en la teoría cuántica aparece una causalidad débil, y es ella la causante de las regularidades estadísticas.

Por último, al parecer la física clásica es necesariamente determinista porque: (1) ha nacido y crecido inmersa en una cosmogonía determinista donde la naturaleza, tan dinámica pero aparentemente inmutable, tiene un fin y debe cumplirlo; la naturaleza es vista entonces como un mecanismo que cuenta con una vocación y con ciertas especificaciones técnicas que están a nuestro alcance, faltándonos solamente descifrar el libro natural para descubrir sus secretos. (2) La física clásica se constituyó en la herramienta con que el hombre puede, y debe, explorar su mundo, para explicar el acontecer natural. La ciencia se vuelve entonces el dispositivo con el cual exploramos nuestro mundo, y (3) La física clásica se destina a estudiar su entorno físico, teniendo la visión de un mundo macroscópico donde impera la continuidad y la separación e inmutabilidad de los objetos de una manera tangible, y donde además el proceso de medición es controlable y no causa problemas. El determinismo de la física clásica es inevitable y aparece, principalmente, en sus conceptos representados ideográficamente y en forma de expresiones matemáticas simples que rigen la evolución cierta del sistema, donde la fuerza se vuelve el protagonista principal del causalismo. Tal conceptualización teórica no es más que una consecuencia de las características cuantificables

(observables) de los sistemas; así, el determinismo es asequible y fácilmente rastreable, así sea unidireccionalmente, con la ventaja innegable de que brinda certezas.

La mecánica cuántica es, en cambio, necesariamente dubitativa y recelosa de las certezas, lo cual se refleja en sus postulados. Su objeto de estudio, al no ser observable, irremisiblemente le ha condenado a ser una teoría descriptiva conceptual, aunque matemáticamente explicativa. El principal inconveniente con el que tiene que lidiar es que sus objetos de estudio sean pequeños, además de que son entidades (duales) que no presentan un comportamiento único e inmutable. Este problema epistémico ha sido irresoluble desde el principio, y es quien le ha llevado a proponer postulados de carácter probabilista que son la base de la teoría. Así, la física cuántica renuncia a explicar cómo es la naturaleza, aunque sus axiomas –emanados de evidencias empíricas– le permiten ir descubriendo más entidades y comportamientos novedosos, asumiéndose en una de las teorías más exitosas de la historia. Aún así, es viable asegurar que su cuerpo teórico se ha constituido en una teoría determinista, aunque sea de carácter probabilista, pues no admite las certezas. La teoría ha surgido como una consecuencia de: (A) evidencias experimentales nuevas e inexplicables para la física clásica. (B) Las entidades del mundo microscópico exhiben características distintas a las de los objetos macroscópicos, no nada más la dualidad, pues no existe la localización sencilla de ellos ni se muestran separados e independientes; los movimientos en el submundo atómico no son continuos y ya no es posible expresar el comportamiento y evolución de los sistemas con ecuaciones paramétricas simples; las ondas cuánticas pueden ser distintas de las ondas clásicas, e ignoramos si las partículas son equivalentes a las partículas clásicas, además de que se ha requerido imprescindible acuñar terminología física adicional a los objetos atómicos (números cuántico principal, orbital, spin, etc.). En suma, la teoría cuántica está sentada sobre un conjunto de inobservables; y (C) La tesis de que la realidad cuántica –y con ello, la realidad– no puede ser abordada o conocida mediante mediciones; por tanto, según la teoría, sólo nos queda dar una descripción de la realidad. En cualquier otro caso, se estaría especulando y hablando metafísicamente.

Como se ve, el problema argumentativo de la teoría cuántica es poderoso, y la teoría está respaldada por hechos tangibles y concretos. Asimismo, esta teoría ha levantado un monumento matemático que da razón del posible comportamiento de los objetos, determinando su estado, así sea como una mera posibilidad, de donde se colige que

también es determinista, y más aún, creo que causalista. La teoría vendría siendo indeterminista sólo cuando se la compara con la física clásica.



## Capítulo 3

### Génesis de la mecánica cuántica

#### Introducción

Cualquier persona que estudia la mecánica cuántica se llena de asombro ante ese campo de conocimientos que suele parecer bastante extraño, no nada más porque se sumerge en un ámbito probabilista, sino también porque no se conoce con certidumbre el comportamiento de los objetos del microcosmos; es decir: no sólo no conocemos todo lo que quisiéramos acerca del comportamiento de las partículas, sino que en realidad ni siquiera sabemos con toda veracidad si son partículas u ondas. Se dice que el mismo Niels Bohr, en Copenhague, profirió aquella célebre sentencia que ejemplifica lo que es la mecánica cuántica:<sup>1</sup> “Those who are not shocked when they first come across quantum theory cannot possibly have understood it.” Igualmente, Bob Wald lo ha expresado en una forma más jocosa al proferir:<sup>2</sup> “Si realmente crees en la mecánica cuántica, entonces no puedes tomarla en serio”.

Pero la mecánica cuántica es una de las teorías más revolucionarias y exitosas en la historia de la ciencia. Su génesis fue un parteaguas en la física que cautivó inmediatamente la atención y causó un profundo revuelo, a la par que sorpresa, dentro de la comunidad científica del siglo XX. Einstein, en un principio, se opuso con vehemencia a algunos conceptos de ella, aun cuando terminó, muy a su pesar, por aceptarla. Esta rama de la Física propuso un conjunto de novedosas y osadas ideas, modificando con ello las estructuras de pensamiento vigentes en la ciencia en ese entonces; su impulso se debió a una camada de jóvenes talentosos con visiones y propuestas que solamente pueden ser catalogadas como geniales, destacándose entre ellos Werner Heisenberg y su famoso Principio de Indeterminación o de Incertidumbre, considerado desde su aparición, un pilar fundamental de la física cuántica.

---

<sup>1</sup>Sentencia proferida en la Interpretación de Copenhague. Tomado de: <http://webs.morningside.edu/slaven/Physics/uncertainty/uncertainty7.html>.

<sup>2</sup> Penrose, R. (1999): *Lo grande, lo pequeño y la mente humana*; Ed. Akal; España, 2006. p. 64.

En este capítulo se hará una breve reseña del nacimiento de la teoría cuántica y se expondrán algunas opiniones de diversas personalidades de la física, unos incondicionalmente a favor y otros con una postura más crítica respecto al estado que guarda la teoría.

### **3.1. Introducción histórica**

En los capítulos anteriores del presente trabajo se expuso una breve semblanza del determinismo y, simultáneamente, se vio que dicha postura filosófica ha llegado a ocupar un lugar preponderante dentro de la física clásica; el determinismo imperante en la física tradicionalmente se ha sustentado en ecuaciones paramétricas que son función del tiempo, o bien, en sistemas de ecuaciones diferenciales que, de un modo u otro, involucran el concepto fuerza y/o leyes de conservación que implícitamente aluden a la fuerza y quedan perfectamente definidas una vez que se han estipulado sus condiciones iniciales, que pueden ser fortuitas o repetidas cuando se tiene determinado control sobre la ocurrencia del evento. La fuerza es, según vimos en el capítulo anterior, el principal sustento de la física clásica, aún cuando haya áreas en los que se opte por no explicitarla, debido al grado de dificultad que presenta trabajar con ella; si bien es un concepto sutil, es muy cercano a nosotros, y tal vez de los más vívidos que podamos encontrar a nuestro alrededor, v.g.: nuestro peso; la fuerza es un concepto sumamente maleable pues nos permite no sólo matematizar los eventos sino también generar imágenes visuales sencillas y fáciles de asimilar que describen con mucha precisión el acontecer del mundo externo. Esto nos permite introducir, como una extrapolación lógica, leyes generales de la naturaleza que dimanen de regularidades estadísticas y, a su vez, las rigen; estas leyes son válidas en todo el universo conocido y son quienes regulan la conducta de los sistemas físicos, aunque no lo hagan ni total ni absolutamente.<sup>3</sup> Así, tanto la legislación de la teoría clásica como el conocimiento de las condiciones iniciales del sistema generaron modelos matemáticos que condujeron a descripciones completas y certeras del comportamiento de los objetos. Esto propició que se pensara que todo en el mundo natural podía determinarse aplicando únicamente las leyes naturales y conociendo las

---

<sup>3</sup> Algo semejante a lo que hacen las costumbres, la moral y las leyes jurídicas con el comportamiento de las personas, que regulan los patrones de conducta, pero dejan la toma de decisiones al individuo, siempre y cuando no afecte a los demás; es decir, las leyes regulan algunos patrones de conducta, pero simultáneamente le otorgan al individuo capacidad de elección, otorgándole libertad.

condiciones iniciales –y quizá condiciones de contorno– del sistema. Si bien esto fue funcional para los objetos macroscópicos, no funcionó con las entidades del micromundo, según quedó de manifiesto con la aparición de la teoría cuántica.

El nacimiento de la mecánica cuántica se fecha a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, y su origen proviene principalmente, de los trabajos de Max Planck, Albert Einstein y Niels Bohr. Los trabajos de Planck al resolver el problema de la radiación de cuerpo negro irrumpieron abruptamente en la física con nuevos conceptos que ponían en entredicho la continuidad del movimiento y de la transferencia de energía, dando origen así a una verdadera revolución en el seno de la física. No hay que olvidar que la física clásica asume que el intercambio de energía entre los cuerpos materiales y la radiación electromagnética se lleva a cabo de manera continua.

Por ese tiempo aparecieron, casi simultáneamente, varios experimentos que ocasionaron que la física clásica enfrentara una profunda crisis por no solucionarlos de manera satisfactoria, y de entre tales experimentos sobresalió el conocido como “catástrofe del ultravioleta”. Como es sabido actualmente, todo cuerpo emite radiación electromagnética dependiendo de su temperatura, y en 1879, un cúmulo de evidencias experimentales mostraron que la energía radiada por un objeto varía con la longitud de onda y la temperatura, lo que condujo a la postulación de un concepto ideal acerca de un cuerpo radiante con la capacidad de absorber todas las longitudes de onda y después reemitirlas, tal cuerpo (ideal) se denominó *cuerpo negro*. De estos estudios se derivaron dos leyes de carácter experimental sumamente importantes: la Ley de Stefan-Boltzmann y la Ley de desplazamiento de Wien.

La ley de Stefan-Boltzmann establece que un cuerpo negro emite radiación térmica con una emisividad total de superficie negra,  $u$ , dada por

$$u = \frac{ca}{4\pi} T^4 = \sigma T^4 \text{ ----- (1)}$$

donde:  $a$  := sección transversal de área,  $c$  := velocidad con que se propaga el calor radiante (considerado como un haz de rayos luminosos), y  $T$  es la temperatura efectiva (o absoluta) de la superficie;  $\sigma$  se denomina constante de Stefan-Boltzmann y tiene un valor (en el sistema internacional) de:

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} .$$

La emisividad de un cuerpo negro, dada por la ecuación (1) fija una cota superior para la potencia radiante emitida por los cuerpos reales.

La ley de Wien, por otra parte, relaciona la longitud de onda ( $\lambda_{m\acute{a}x}$ ) y la temperatura ( $T$ ) de un cuerpo negro mediante la expresi3n

$$\lambda_{m\acute{a}x} T = \omega = 2.90 \times 10^{-3} m \cdot K \text{ ----- (2)}$$

donde  $\omega$  es la constante de Wien, y es un valor experimental. Lo que se deriva de esta ley es que entre mayor sea  $T$ , menor ser3  $\lambda_{m\acute{a}x}$  –que da el pico de la curva– en la cual emite.

Al pretender solucionar estos problemas de 3ndole emp3rica empleando primeramente la termodin3mica, y despu3s la mec3nica estad3stica, Planck se vio en la necesidad de introducir los conceptos del cuanto de acci3n y de la cuantizaci3n de la energ3a, “fundando” as3 el 3rea de la f3sica hoy denominada mec3nica cu3ntica. Las ideas que se desprendieron de esta nueva teor3a fueron –y siguen siendo– altamente impactantes, no s3lo para la f3sica, al suministrar planteamientos novedosos que permiten abordar el comportamiento de los objetos at3micos y predecir su posible evoluci3n, sino que tambi3n han trascendido su propia esfera de aplicaci3n para extenderse paulatinamente a todo el conocimiento cient3fico en general.

Parafraseando a Kuhn,<sup>4</sup> podemos decir que el origen de la mec3nica cu3ntica se debi3, principalmente, a esa “anomal3a” experimental encarnada por la radiaci3n de cuerpo negro –que no es m3s que la radiaci3n t3rmica– que vino a poner en entredicho la (aparente) fortaleza conceptual de la f3sica cl3sica y que desemboc3 en una enorme crisis de credibilidad ante la incapacidad de explicar satisfactoriamente el problema.

Fue por tal motivo que Planck desarroll3, en 1900, un modelo estructural para la radiaci3n de cuerpo negro;<sup>5</sup> dicho modelo conduce a una ecuaci3n te3rica para la

---

<sup>4</sup> Kuhn, T. S. (2006): *La Estructura de las Revoluciones Cient3ficas*; FCE; M3xico.

<sup>5</sup> De hecho, se di3 a conocer en ese a3o, ya que «En una reuni3n de la Sociedad Alemana de F3sica, el 14 de diciembre de 1900, Max Planck ley3 un trabajo intitulado “*La teor3a de la ley de distribuci3n de energ3as del espectro normal*”. Este trabajo que en un principio atrajo poca atenci3n, fue el precursor de una revoluci3n en la f3sica. La fecha de su presentaci3n se considera como el nacimiento de la f3sica cu3ntica, a pesar de que fue hasta un cuarto de siglo despu3s, cuando Schr3dinger y otros desarrollaron la mec3nica cu3ntica moderna,

distribución de longitudes de onda que coincide completamente con los valores experimentales medidos (de todas las longitudes de onda). La fórmula que obtuvo Planck para una cavidad radiante fue:

$$\bar{\varepsilon}(\nu) = \frac{h\nu}{e^{(h\nu/kT)} - 1} \rightarrow kT, \text{ siempre que } \frac{h\nu}{kT} \rightarrow 0 \text{ ----- (3)}$$

donde:

$h = 6.626 \times 10^{-34}$  J·s (constante de Planck),

$\nu$  = frecuencia (en Hertz),

$k = 1.38 \times 10^{-23}$  J·K (constante de Boltzmann),

$T$  = Temperatura (en K), y

$\bar{\varepsilon}(\nu)$  = energía media (en J).

Así pues, en este modelo, Planck supuso la existencia de osciladores en las paredes del cuerpo negro, asociados a cargas en el interior de las moléculas. Formuló también dos suposiciones, que a más de atrevidas, resultaron controvertidas al aludir a la naturaleza de tales osciladores, llevándolo a postular que:

- *Cualquier ente físico con un grado de libertad, cuya “coordenada” es una función senoidal del tiempo (es decir, realiza oscilaciones armónico-simples) sólo puede poseer energías totales  $E$ , que satisfacen la relación*

$$E = nh\nu \quad n = 0,1,2,3 \dots \text{ ----- (4)}$$

Donde  $\nu$  es la frecuencia de oscilación y  $h$  es una constante universal.<sup>6</sup>

- *Las moléculas absorben o emiten energía en cantidades discretas en forma de luz llamados cuantos de acción (fotones), cuya energía está dada por  $E = h\nu$ .*

---

base del conocimiento actual». (Eisberg, R. y Resnick, R. (1997): *Física cuántica. Átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas*; Limusa Noriega Editores; México, 1997. p. 19).

<sup>6</sup> Eisberg-Resnick., *op. cit.*, p. 39. La expresión matemática (4) se conoce comúnmente como relación de Einstein, por ser él quien aclaró el problema en el que se encontraba inmerso Planck al trabajar con los osciladores ideales constituyentes del cuerpo negro.

La primer suposición recibe actualmente el nombre de *Postulado de Planck*, y nos dice que la energía de los osciladores está cuantizada, es decir, que éstos sólo pueden tener valores discretos de energía  $E$ . Estos postulados, sin duda alguna, propiciaron un abrupto rompimiento con la física clásica, en la que subsiste la concepción de que la energía es un continuo.

Empero, al proponer sus resultados, Planck tenía serias dudas acerca la constante  $h$ , pues no tenía claro si ésta poseía un significado físico más profundo que el de ser una constante de proporcionalidad. Por mucho tiempo, el científico intentó re-explicar sus resultados “cuantizados”, buscando cómo ajustarlos a los conceptos de la física clásica, siendo infructuosos sus esfuerzos. Muy al contrario, conforme formulaba nuevas ideas para abordar el problema, más se convencía que estaba en el camino correcto; fueron los trabajos del concepto estadístico de entropía, de la tercera ley de la termodinámica, y la visión que Einstein dio al electromagnetismo, la mecánica estadística y su explicación del efecto fotoeléctrico, lo que lo llevaron a convencerse de que su hipótesis cuántica era correcta.

El segundo trabajo en importancia, y soporte vital para los trabajos de Planck, fue la explicación dada por Einstein al problema del ya citado efecto fotoeléctrico. En el experimento que da origen a este trabajo, se hace incidir luz monocromática de frecuencia  $\nu$  sobre una placa metálica que libera electrones, produciendo una corriente eléctrica que puede medirse con un amperímetro. Al iluminarse la placa, los electrones despedidos adquieren una energía que está dada por la expresión:  $E = h\nu$ , notándose que la energía depende solamente de la frecuencia de la luz y no de su intensidad;<sup>7</sup> dicho más claramente: la física clásica predice que el número de fotoelectrones emitidos por la superficie es proporcional a la intensidad de la luz incidente –o sea, a la radiación electromagnética que incide en la placa–, pero la energía transferida a los fotoelectrones

---

<sup>7</sup> De hecho, la explicación al problema del efecto fotoeléctrico apareció en 1905, siendo uno de los famosos artículos que Einstein publicó en tal año. En su trabajo, Einstein demostró que su concepto de fotón explicaba los tres hechos experimentales del efecto fotoeléctrico: **Hecho 1:** Si la luz de determinada longitud de onda incide sobre un emisor, el potencial de frenado no depende de la intensidad de ella. **Hecho 2:** La frecuencia de la luz que incide sobre un emisor debe ser mayor que la de cierto valor  $\nu_0$ . En caso contrario no se producirá el efecto fotoeléctrico. **Hecho 3:** Los fotoelectrones se emiten de inmediato una vez que la luz incidente llega a la superficie del emisor. Así pues, Einstein propuso su famosa ecuación (denominada *ecuación fotoeléctrica de Einstein*):  $hf = \phi + T_{k\text{máx}}$ , donde  $\phi$  se conoce como función trabajo,  $f$  es la frecuencia, y  $T_{k\text{máx}}$  es la energía cinética máxima de los fotoelectrones emitidos por la placa. (Resnick, R.; Halliday, D. & Krane, K. S. (2002): *Física*, Vol. 2; CECSA. México. pp. 1019-1020).

no depende de tal intensidad, sino que depende de la frecuencia de la luz y aumenta linealmente a partir de cierto valor umbral, característico del material.

El efecto fotoeléctrico puso nuevamente en aprietos a la física clásica, pues ésta establece que la energía depende continuamente de la intensidad de la radiación electromagnética incidente, y que a menor intensidad, menor corriente eléctrica, y viceversa (recordemos que en ese tiempo la naturaleza ondulatoria de la luz había sido admitida debido a un cúmulo de evidencias experimentales contundentes, descollando los experimentos de interferencia y difracción). Sin embargo, este fenómeno muestra sin duda alguna que la luz asume un comportamiento corpuscular!

Así pues, el efecto fotoeléctrico vino a confirmar –y a reavivar– la polémica surgida en el siglo *XVII* entre Newton y Huygens al mostrar que la luz está constituida por corpúsculos (hoy día llamados fotones), tal y como Newton aseguraba (Huygens defendía la naturaleza ondulatoria de la luz); además, le atribuyó un carácter discreto a la energía y fluctuaciones de naturaleza estadística al haz de partículas incidentes.

El tercer problema que contribuyó a la génesis de la mecánica cuántica correspondió a Bohr. En ese tiempo se contaba con los resultados de un conjunto de investigaciones en las que se admitía que la materia está constituida de átomos y que éstos, a su vez, están compuestos de otras partículas más livianas: los protones, con carga eléctrica positiva y los electrones, con carga eléctrica negativa. El modelo del átomo aceptado provenía de los experimentos de Rutherford, consistiendo en un sistema planetario en miniatura, con los electrones orbitando alrededor del núcleo (que tiene carga positiva por ser la región donde se localizan los protones). Ahora bien, según la física clásica (sobre todo las ecuaciones de Maxwell), a medida que los electrones giran, deberían perder energía en forma de radiación electromagnética con una velocidad proporcional al cuadrado de la aceleración del electrón, cayendo finalmente hacia el núcleo. Sin embargo, tal cosa no ocurre. Esto llevó a pensar que la física clásica no contemplaba algún factor adicional que hiciera posible la explicación de por qué el electrón permanece en una órbita de manera estable y sin irradiar, a menos que experimentase alguna perturbación.

Bohr analizó a fondo este problema y lo solucionó postulando que el electrón sólo puede permanecer en una órbita base, donde mantiene la energía más pequeña posible, y que puede saltar a las demás órbitas irradiando la diferencia total de energía

$$\Delta E = E_1 - E_2 \text{ ----- (5)}$$

en un solo cuanto de luz con una frecuencia dada por la relación de Einstein:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = h\nu \text{ ----- (6)}$$

donde  $E_1$  es la energía del estado base, y  $E_2$  es la energía asociada a la nueva órbita. Este postulado (denominado a veces *postulado cuántico*) vuelve a retomar la discretización de la energía –al asumir que en los átomos existen niveles de energía– y enuncia que únicamente pueden emitirse frecuencias discretas de luz que corresponden a los respectivos saltos entre los distintos valores de energía posibles.

El avance de las nuevas ideas llevó a una camada de científicos jóvenes (Bohr, Pauli, de Broglie, Heisenberg, Dirac, Born, Jordan, von Neumann, Schrödinger, etc.)<sup>8</sup> a impulsar el despegue de la mecánica cuántica, proponiendo un conjunto de conceptos revolucionarios que propiciaron una ruptura con la física clásica. Sus propuestas, basadas en conceptos físicos muy osados y con un elevado grado de abstracción permitieron esclarecer un cúmulo ingente de evidencias experimentales que se hallaban sin explicación hasta ese momento. Sin duda alguna, uno de los grandes conceptos que marcó un hito en la historia de la ciencia fue el Principio de Incertidumbre de Heisenberg, que vino a derrumbar la certidumbre habitual de la física clásica –acostumbrada a las pruebas y demostraciones de sus principios, desde las leyes de Newton hasta las leyes de la electrodinámica de Maxwell–, apoyando el indeterminismo como parte esencial no nada más de la teoría cuántica, sino del conocimiento en general.

En suma, la mecánica cuántica introdujo en la física un conjunto de conceptos y postulados que han alterado la estructura básica tradicional de la física, causando polémicas y discusiones a través de los años. Los conceptos fundamentales son:

- El empleo de las funciones de estado que describen al sistema cuántico y cuya información es esencialmente de carácter estadístico o probabilístico; debe subrayarse que estas funciones no pueden observarse directamente.
- La promulgación de observables, que son el conjunto de observaciones y mediciones de las propiedades físicas o atributos del sistema bajo estudio; se los representa por

---

<sup>8</sup> Aquí incluyo a Schrödinger, que aunque no era tan joven como los otros, contribuyó enormemente con el desarrollo de la teoría, al crear lo que se conoce como mecánica (cuántica) ondulatoria. Esto se abordará en el capítulo siguiente.

operadores matemáticos. Una manera más sencilla de decirlo es: los observables son las propiedades de los sistemas bajo estudio que pueden medirse, v. g.: posición, energía, momento lineal, etc.

- El proceso de observación, que conlleva una interacción entre el instrumento de medición y el sistema observado.
- La interacción a escala cuántica posee características discretas, y no puede disminuir más que hasta cierto límite.
- El acto de observar provoca en el sistema perturbaciones incontrolables e irreducibles.

Los conceptos fundamentales se propusieron como postulados,<sup>9</sup> y son los pilares de este campo de estudio; tales proposiciones son:

- ❖ Al querer asignar atributos físicos habituales a los objetos atómicos, como resulta evidente en el dilema planteado respecto a las propiedades corpusculares y ondulatorias de los electrones y fotones, nos enfrentamos con imágenes contrapuestas, cada una de las cuales se refiere a un aspecto esencial de la información empírica (de ellos obtenida).<sup>10</sup> (*Principio de Complementariedad de Bohr*).

---

<sup>9</sup> Someramente hablando, podemos decir que un postulado es aquel enunciado que se asume como cierto, siendo innecesario dar una prueba inicial. Dicho supuesto adquiere una importancia fundamental por constituirse en el punto de partida que posteriormente soportará la estructura lógica de una teoría. Si bien la certeza y precisión forman parte inicial de la teoría, la validez de ésta se irá evaluando constantemente conforme transcurre el tiempo al contrastarse con los hechos empíricos, aun cuando los experimentos que la validan o refutan sean controlados. Aunque aquí hay que dejar en claro que existe una intensa controversia acerca de la validez o no de la teoría pues según Popper, toda teoría que sea verdadera debe haber sido falsada, pero Kuhn objeta esto, pues para él no queda claro cómo o dónde se debe falsar la teoría, sino que lo que se hace es certificarla, encontrándose que la teoría no es falsa sino, probablemente, una parte de ella. Esta discusión nos conduce a ver con claridad el (posible) carácter perentorio de la teoría, al no haber una teoría que podamos suponer como absoluta. Por tanto, la validez de una teoría siempre será provisional, y subsistirá hasta en tanto no encontremos evidencias experimentales que la contradigan y exhiban sus limitantes o errores en que ha incurrido el formalismo lógico o conceptual que conforma el entramado teórico.

<sup>10</sup> Bohr, N. (1964); *Física atómica y conocimiento humano*; Aguilar, S. A. de Ediciones; España; p 49-50. Esto puede decir, de manera más simple, que los objetos no son ondas ni partículas, sino que asumen el papel de uno u otro objeto dependiendo de la observación que se lleve a cabo. Formalmente se enuncia: “*Los objetos en la naturaleza no son partículas ni son ondas; un experimento o medición que resalte una de estas propiedades, lo hace necesariamente a expensas de la otra. ... La descripción cuántica de las propiedades de un sistema físico se expresa en términos de parejas de variables mutuamente complementarias. La precisión en la determinación de una de estas variables, necesariamente implica una imprecisión en la determinación de la otra.*” (Saxon., *Elementary Quantum...* pp 16-17).

- ❖ No es posible determinar la fijación de dos variables conjugadas  $q$  y  $p$  de una partícula con precisión ilimitada, es decir,  $\Delta q \cdot \Delta p \approx h$ . (*Principio de Incertidumbre de Heisenberg*).
- ❖ En el límite clásico, las probabilidades cuánticas deben de convertirse en certidumbres; las fluctuaciones resultan despreciables. (*Principio de correspondencia*).<sup>11</sup>

Las proposiciones anteriores posteriormente se expresaron en el lenguaje de la matemática para impulsar el desarrollo más formal de la teoría; este replanteamiento, llevado a cabo por Dirac y von Neumann, constó de los siguientes postulados:<sup>12</sup>

- ❖ **Postulado 1.** Todo estado cuántico está representado por un vector normalizado, llamado en algunos casos, vector de estado perteneciente a un espacio de Hilbert complejo y separable  $\mathcal{H}$ . Fijada una base del espacio de Hilbert unitaria  $\{|u_n\rangle\}_{n=1}^N$  tal que

$$\text{si } \{|u_n\rangle \in \mathcal{H}; \langle u_n, u_m \rangle = \delta_{nm}; \forall \psi \in \mathcal{H} \rightarrow \psi = \sum_{i=1}^N c_i u_i\}$$

se puede representar el estado de las siguientes formas vectoriales:

Forma ket:

$$\text{rep}_{\underline{u}}(|\psi\rangle) = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle u_1 | \psi \rangle \\ \langle u_2 | \psi \rangle \\ \vdots \end{pmatrix}$$

Forma bra:

$$\text{rep}_{\underline{u}}(\langle \psi |) = (c_1^* c_2^* \dots) = (\langle \psi | u_1 \rangle \langle \psi | u_2 \rangle \dots),$$

donde “\*” significa complejo conjugado. El espacio de kets y bras forman espacios vectoriales duales uno de otro. Puesto que todo espacio de Hilbert es reflexivo, ambos

<sup>11</sup> Este principio no es más que un proceso matemático limitante en el que  $h$  se hace tender a cero.

<sup>12</sup> Tomado de: [http://es.wikipedia.org/wiki/Postulados\\_de\\_la\\_Mec%C3%A1nica\\_Cu%C3%A1ntica](http://es.wikipedia.org/wiki/Postulados_de_la_Mec%C3%A1nica_Cu%C3%A1ntica). De manera semejante aparecen, aunque no en forma tan compacta, en otros textos, como en el caso de: Griffiths, D. J. (2005): *Introduction to Quantum Mechanics*, 2<sup>nd</sup> Ed.; Pearson Prentice Hall. USA. pp. 93-125.

espacios son isomorfos y, por tanto, constituyen descripciones esencialmente semejantes.

- ❖ **Postulado II.** Los observables de un sistema están representados por operadores lineales hermíticos (autoadjuntos). El conjunto de autovalores (valores propios) del observable  $\mathcal{O}$  recibe el nombre de espectro y sus autovectores (vectores propios), exactos o aproximados, definen una base en el espacio de Hilbert. En la misma base unitaria  $\{|u_n\rangle\}_{n=1}^N$ , los representantes de un observable  $\mathcal{O}$  se definen como:

$$\text{rep}_{\vec{u}} \mathcal{O} = \begin{pmatrix} o_{11} & \cdots & o_{1n} \\ \vdots & o_{ij} & \vdots \\ o_{n1} & \cdots & o_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle u_1 | \mathcal{O} | u_1 \rangle & \cdots & \langle u_1 | \mathcal{O} | u_n \rangle \\ \vdots & \langle u_i | \mathcal{O} | u_j \rangle & \vdots \\ \langle u_n | \mathcal{O} | u_1 \rangle & \cdots & \langle u_n | \mathcal{O} | u_n \rangle \end{pmatrix}$$

- ❖ **Postulado III.** Cuando un sistema está en el estado  $|\psi\rangle$ , la medida de un observable  $A$  dará como resultado el valor propio  $a$ , con una probabilidad

$$P_{A|\psi} = |\langle a | \psi \rangle|^2,$$

donde  $|a\rangle$  es el vector propio asociado al autovalor  $a$  (en notación del espacio de Hilbert esto se expresa como:  $A|a\rangle = a|a\rangle$ ). Como consecuencia de este postulado el valor esperado será:

$$\langle A \rangle_{|\psi\rangle} = \sum_i \lambda_i |\langle a_i | \psi \rangle|^2 = \langle \psi | A | \psi \rangle.$$

Llamaremos dispersión o incertidumbre a la raíz cuadrada de la varianza.

- ❖ **Postulado IV.** Para cualquier estado  $|\psi\rangle$  sobre el cual se hace una medida de  $A$  que filtra al estado  $|a_i\rangle$ , pasa a encontrarse precisamente en ese estado  $|a_i\rangle$  si no se ha destruido durante el proceso.

- ❖ **Postulado V.** La evolución temporal de un sistema se rige por la ecuación de Schrödinger:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle = \mathcal{H} |\psi(t)\rangle$$

donde  $\mathcal{H}$  es el operador de Hamilton o hamiltoniano del sistema, que corresponde a la energía del sistema.

- ❖ **Postulado VI.** Los operadores de posición y momento satisfacen las siguientes reglas de conmutación:

$$[X_i, X_j] = 0; \quad [P_i, P_j] = 0; \quad [X_i, P_j] = i\hbar \delta_{ij} \mathbb{I}$$

Tales son los postulados, expresados matemáticamente, que sostienen la teoría cuántica y como se ve, se respaldan en los espacios de Hilbert, que son espacios métricos lineales que gozan de un producto interior, de dimensión infinita, completos (respecto a la métrica) y separables.<sup>13</sup> Salta a la vista que la matemática cobra vida con gran intensidad en la descripción de los sistemas cuánticos porque los resultados matemáticos son, a veces, más elocuentes que las representaciones ideográficas que podamos tener acerca de los objetos atómicos. La teoría cuántica es, en efecto, una teoría preeminentemente matematizada por considerar que si el micromundo no podemos representárnoslo de manera ‘visual’ por no contar con experiencias sensibles previas, al menos podemos ‘representarlo’ y verificarlo (o validarlo) por los métodos lógico-formales de índole matemática. Y es que esta representación matemática, según lo muestra la experimentación, es más efectiva, menos ambigua y más precisa que las representaciones de los objetos atómicos que nos pudiera brindar la física clásica. Pero esta matematización un tanto alejada de la conceptualización física conlleva un riesgo

---

<sup>13</sup> Hilbert es el impulsor del método axiomático en matemáticas, y asegura que la postulación de axiomas da una estructura lógica y formal a un campo de conocimiento dado, además de dotar de rapidez y efectividad a la generación y transmisión del conocimiento; es así que enuncia: “*Si observamos de cerca una teoría determinada, reconoceremos en ella un reducido número de proposiciones distinguidas que sirven de fundamento para la construcción del entramado de conceptos [...] A partir de esas proposiciones y con base en principios lógicos, podemos obtener en su totalidad el edificio conceptual que subyace a la disciplina en cuestión*”. (Hilbert., *Fundamentos de...* p. 24). Sobra decir que este método de organización fue implementado en la mecánica cuántica.

enorme: la aparente renuncia a explicar qué es la realidad, aunque digo aparente porque habría que cuestionarnos concienzudamente acerca de qué entendemos por “realidad”, y si en verdad es como la admitimos convencionalmente, pues si las evidencias experimentales se empeñan en dar los mismos resultados, independientemente del espacio y el tiempo, entonces el comportamiento de los objetos atómicos nos muestra que la realidad en esos ámbitos es muy distinta a lo que creemos que es.

Pero retomando el caso de la renuncia a la realidad que súbitamente aparece cuando consideramos la matematización *per se* de la teoría cuántica, podemos incurrir en el desliz de que, efectivamente, la suplantación de aquella naturaleza paradigmática de la física clásica por otra representada puramente por la matemática puede derivar hacia un mundo que existe más en las ideas que en el mundo real, haciendo de la naturaleza un elemento más del universo lógico-formal que del universo tangible. Esto no es algo único en la física contemporánea, pues si recordamos, Galileo, Newton, Leibniz y Descartes, como buenos físicos, impulsaron la representación de los eventos naturales mediante el lenguaje matemático, dado que

El físico afirma que los símbolos matemáticos que emplea pueden ser utilizados para la interpretación, coligación y predicción de las impresiones de los sentidos. Por muy abstracto que se haga su trabajo, nunca pierde su relación con la experiencia. Se ha encontrado que las fórmulas matemáticas pueden expresar ciertas leyes que gobiernan el mundo que observamos. Jeans arguye que el mundo debe haber sido por un matemático, por el placer de ver estas leyes realizándose.<sup>14</sup>

Es decir, los científicos mencionados, al igual que muchos científicos contemporáneos, justifican su proceder “matematizador” de la realidad al asumir, tácitamente, que puede haber una correspondencia uno-a-uno entre el suceso físico y su representación simbólica, y a pesar de mantener presente que la realidad es algo independiente del observador, subyace implícitamente en tal postura el cuestionamiento de si la naturaleza no posee una estructura lógico-formal análoga a la de la matemática, por lo que la tesis realista-materialista tradicional se ve obligada a apoyarse en la matematización como una manera más elegante y sencilla de abordar la realidad.

Se tienen entonces dos visiones destinadas a una colisión: la visión explicativa de la física clásica, sustentada en el realismo y que atribuye una realidad tangible e independiente a las entidades teóricas con que trabaja, y el idealismo declarado de la teoría cuántica, que se rehúsa a admitir esa ‘realidad explicativa’, mutándola por una

---

<sup>14</sup> Russell, B. (1931): *La perspectiva científica*; Ed. Ariel, S. A. España. 1974. p. 93.

‘realidad descriptiva’ simplificadora que sólo se apega a predecir lo que puede ocurrir con esa naturaleza extraña del micromundo, a tal grado que Heisenberg cuestiona uno de los conceptos fundamentales de la teoría clásica al decir que en la física cuántica una partícula elemental “no es una formación material en el espacio y el tiempo, sino en cierto modo un símbolo, adoptado el cual, las leyes de la naturaleza adquieren una forma particularmente simple”.<sup>15</sup>

Y es que como hemos visto,<sup>16</sup> los sucesos a nivel macroscópico son explicados satisfactoriamente por la mecánica de Newton que, podría pensarse, en primera instancia, debería extenderse a lo muy pequeño y relacionar la fuerza con los campos y la geometrodinámica del espacio, cosa que hasta este momento comienza a intentarse.<sup>17</sup> Mientras tanto, la realidad microscópica se empeña en mostrarnos una faz tan distinta a lo que ordinariamente percibimos, que una descripción (o semi-explicación) tan certera y tan fríamente matemática de esta clase de fenómenos nos conduce a cuestionarnos si verdaderamente es la realidad lo que creemos que es, o en su defecto, la teoría cuántica está equivocada.

La mecánica cuántica encara el primer reto y lo hace proponiendo que, efectivamente, la realidad atómica no es como la realidad que conocemos a nivel cotidiano, por lo que adopta como recurso ‘explicativo’ de esa otredad desechar la concepción realista habitual proveniente de las representaciones macroscópicas y sustituirla por una realidad alternativa donde, incluso, se permite la coexistencia de entes clásicamente disímbolos (corpúsculo y onda); la seguridad de ocurrencia de un evento se trueca en probabilidades y no se conocen con certeza las variables requeridas para determinar el movimiento de los sistemas físicos. Esta realidad alternativa parece ser, a fin de cuentas, la única opción con que contamos al acceder al microuniverso, y su existencia es validada mediante los datos experimentales. Es por esto que, aparentemente, la mecánica cuántica se contenta sólo con dar testimonio del acaecer atómico, vía la matemática, y se convierte así en una especie de algoritmo orientado a resolver los problemas que se le van presentando. Sin embargo, creo que la mecánica cuántica sí da explicaciones, así sea de manera estadístico-probabilista, pues permite colegir por qué ocurren las cosas; gracias a esta explicación (o semi-explicación), aunque no sea tan detallada como en la física clásica, ha

---

<sup>15</sup> de la Peña., *Introducción a la...* p. 876.

<sup>16</sup> *Cfr.* Capítulo 2.

<sup>17</sup> Que son las entidades más pequeñas e irreductibles de las que podemos ‘echar mano’; sin embargo, en este momento esto no deja de ser una quimera, pues las dificultades que se presentan son muchas.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

sido posible establecer una especie de concatenación de consecuencias, o ilación de conceptos, cada vez más elementales y profundos que nos han adentrado más y más en las profundidades del átomo; prueba de ello son un sinfín de sub-partículas o entidades teóricas que han ido apareciendo y que han servido para 'suavizar' la teoría y darle mayor amplitud y profundidad 'explicativa' del por qué los objetos se comportan como lo hacen y no de otra manera. Por ejemplo, para explicar el comportamiento de los electrones en sus orbitales se introdujo la idea del spin, o bien, para contestar la interrogante del por qué de la carga eléctrica en las partículas elementales (electrón y protón, por mencionar algunas), se introdujo un nuevo objeto que es el causante de la carga eléctrica: la partícula quark. Y así podríamos seguir enumerando casos, avalados por una buena parte de los resultados empíricos. Ahora bien, si bien es verdad que las susodichas entidades teóricas elementales no pueden observarse, sí podemos suponerles una existencia 'real' por ser quienes afectan y permiten sustentar (y encadenar) los eventos, así sea probabilísticamente; es decir, funcionan, de hecho, como una relación causal que se pondera bajo condiciones particulares del comportamiento del sistema; por esto, dichas entidades pueden ser inferidas u 'observadas' indirectamente por la manera en que 'balancean' el evento estudiado, volviendo innecesario cuantificarlas (medirlas) directamente.

Por otra parte, la teoría cuántica niega el hecho de que sea ella quien esté equivocada y para ello antepone como justificación su elevado grado de precisión y su capacidad de pronosticar la ocurrencia de eventos novedosos. Procede de esa manera porque se apoya en el hecho de que aún no hemos encontrado las leyes básicas que rigen el micromundo, y dado que las leyes de la teoría dimanar directamente de evidencias experimentales, no ha quedado más opción que diseñar una teoría pragmática y altamente matematizada. ¿Por qué? Bueno, podría argumentar que si tomamos en cuenta que el ser humano se encuentra inmerso en el mundo natural y observa lo que ocurre a su alrededor, es fácil entender que uno de sus más íntimos deseos sea el explicar la ocurrencia de las cosas. Pero también es cierto que el ser humano es una criatura que deambula entre 'dos realidades': una tangible e independiente de cómo es percibida, fuera de él, y la otra que depende de la percepción que de ella se tenga. La primer realidad es el mundo externo y la consideramos –al menos en la física clásica– objetiva e independiente de nosotros. La realidad intangible es, por otra parte, aquella 'realidad' que representamos mediante esquemas y modelos, y que consideramos válida porque sus

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

predicciones entran en consonancia con los resultados experimentales, por lo que suponemos que *así debe ser* la realidad externa; esto es en buena medida lo que nos ha permitido establecer leyes naturales, representadas matemáticamente como el equivalente de verdades (naturales). Esta idea de representación armónica viaja a lo largo y ancho de la ciencia, y es lo que impele la matematización platónico-galileo-newtoniana de la naturaleza, postura a la que se suma Hilbert al asegurar que

Un fenómeno aún más notorio que el de esta idea de la unidad (*de las leyes de la naturaleza*) es el que podríamos llamar la armonía preestablecida, que pone claramente de manifiesto la existencia de una relación entre la naturaleza y el pensamiento. [...] La teoría de la demostración [...] representa igualmente un ejemplo de armonía preestablecida.<sup>18</sup>

Es esta segunda realidad –idealizada y simplificada en principio– una calca perfecta del mundo real y las conclusiones que hemos obtenido matemáticamente se asumen como válidas e invariantes; es decir, se satisface la relación uno a uno entre la ‘realidad real’ y la ‘realidad idealizada’ (al menos a nivel macro). Pero en el nivel microscópico es difícil sostener esta reciprocidad pues no sabemos qué clase de entes físicos son los objetos atómicos, lo cual es un obstáculo explicativo, de acuerdo a la visión clásica aunque, si admitimos que la realidad puede ser distinta a la del nivel macroscópico debido a que en el nivel microscópico los objetos casi no presentan inercia (pues casi no tienen masa) y sus ligaduras no son tan fuertes como las que aparecen en los objetos del ámbito macroscópico, es fácil admitir que la matematización funge como otro tipo de explicación, además de que esta ‘descripción o explicación matemática’ nos permite solucionar los problemas empíricos inmediatos que se nos van presentando. Heisenberg manifiesta su manera de pensar respecto a las verdades del tipo matemático al proponer que

En la teoría de los cuantos, la situación descrita quedó dominada en cuanto se logró representarla matemáticamente, y con ello prever para cada caso, con claridad y sin peligro de contradicciones lógicas, el resultado de un experimento. Para ello, ha habido que hallar fórmulas matemáticas que expresaran, no la Naturaleza, sino el conocimiento que de ella tenemos, renunciando así a un modo de descripción de la Naturaleza que era el usual desde hacía siglos, y que todavía pocos decenios atrás era tenido por la meta indiscutible de toda ciencia natural exacta.<sup>19</sup>

Como se ve, enfrentamos un serio dilema por no poder elucidar qué tipo de realidad es la verdadera: la clásica, que vale a gran escala pero es de nula funcionalidad en los

---

<sup>18</sup> Hilbert...*Fundamentos de...* p. 123.

<sup>19</sup> Heisenberg, W. (1955): *La imagen de la Naturaleza en la física actual*; Planeta-Agostini; España. 1994. p. 21.

ámbitos nanoscópicos; o la cuántica: operativa y adecuada a las necesidades descriptivo-explicativas de la teoría, aún cuando se le considere poco clarificadora conceptualmente.

La realidad cuántica se empeña en parecerse inverosímil, por lo que, de acuerdo a nuestras exigencias realistas macroscópicas, para hablar de una realidad cuántica exenta de problemas epistémicos deberíamos ser capaces de solucionar, como primer paso, la paradoja que suscita el dualismo *onda-partícula* de los objetos atómicos, que se admite como válida por provenir de evidencias empíricas y por brindar una descripción más apegada a lo que ocurre en la experimentación. Es verdad que muchas críticas se hacen a la teoría cuántica, principalmente por este hecho, a pesar de que operativamente el problema está resuelto pues esta 'dualidad ontológica' (por llamarle de algún modo) se ha fusionado en expresiones matemáticas altamente precisas y confiables que permiten manipular 'las componentes duales' como el equivalente de una verdad natural; así procedemos cuando deseamos cuantificar la partícula asociada a la onda o viceversa.<sup>20</sup> De hecho, Einstein fue el primero en introducir la 'corpúscularidad o granularidad de la radiación', abandonando con ello la interpretación maxwelliana de la continuidad radiante, característica de la física clásica. Einstein tendió el puente entre los modelos ondulatorio y corpuscular, conectándolos mediante una interpretación probabilista. De la misma manera, Born, siguiendo los pasos de Einstein, se encargó de vincular fuertemente las teorías ondulatoria y corpuscular de la materia. Es esta aparente paradoja de la naturaleza dual de la materia la que sostiene los postulados de la mecánica cuántica; al respecto, y como dato curioso, dentro del diálogo epistolar entre estos dos titanes del pensamiento físico, queda claro cuán distinta percibían ambos la naturaleza atómica y la evolución de la teoría cuántica, pues en una carta de Einstein a Born, aquél expresa:

Nos hemos convertido en antípodas en nuestras expectativas científicas. Tú crees en el Dios que juega a los dados, y yo en la ley y en el orden completo en un mundo que objetivamente existe, y el que de una forma especulativa de modo salvaje estoy intentando capturar. Yo creo firmemente, pero espero que alguien descubrirá una forma más realista, o quizás una base más tangible que la que yo he intentado buscar. Incluso el gran éxito inicial de la teoría cuántica no me hace creer en el juego de dados, aunque me doy perfecta cuenta de que nuestros colegas más jóvenes interpretan esto como un efecto de senilidad. No hay duda de que llegará el día en que veamos cuál de estas actitudes instintivas era la correcta.<sup>21</sup>

---

<sup>20</sup> Por ejemplo, apoyándonos en la ecuación de de Broglie obtenemos la longitud de onda de la luz considerando la energía de un quantum, y viceversa. En el caso de la luz, aparece la ecuación de onda que se deriva de las ecuaciones de Maxwell.

<sup>21</sup> Carta de Einstein a M. Born: 7/Septiembre/1944. Aparece en la Entrevista a J. Stewart Bell, Ingeniero cuántico; en: Bernstein, J. (1991): *Perfiles cuánticos. Un análisis de la Física Cuántica*. McGraw-Hill/Interamericana de México. México. 1992. p. 40.

Hasta el día de hoy, y con el desarrollo de la teoría estándar –aún sujeta a algunas comprobaciones– parece ser que Born tenía razón.

### 3.2. Opiniones de científicos

Aun cuando se admite que la mecánica cuántica es lógica, consistente, funcional, y la respaldan los impresionantes logros alcanzados en la explicación y predicción de un sinnúmero de eventos del microcosmos, la polémica va tras sus pasos desde su nacimiento manteniéndose constante –y creciendo a ratos– a través del tiempo de su aún breve existencia (una centuria). La controversia se ha dado alrededor de sus conceptos esenciales que, además de modificar la visión de los físicos, han captado la atención de los filósofos, quienes los consideran dignos de ser sometidos a riguroso escrutinio por parte de la filosofía por plantear profundos problemas epistemológicos, de entre los que destacan la dualidad onda-partícula y el azar en la naturaleza.

De entre los físicos, y del grupo de los apologistas de la mecánica cuántica destaca Niels Bohr, pionero de la naciente teoría y promotor ferviente de la interpretación actual de esta rama de la física, al ser la cabeza visible de la Interpretación de Copenhague y su polémico enfoque probabilista–subjetivista, en la que el observador adquiere un papel central en su interacción con los objetos del micromundo.

Dicha interpretación –quizá la más citada en la historia de la física– se da a conocer en 1927, en Como, Italia, y es formulada conjuntamente por Bohr, Heisenberg y Born.<sup>22</sup> En la declaración se enuncia que:<sup>23</sup>

1. *La Mecánica Cuántica es completa.* Las probabilidades, superposiciones y propiedades de indeterminación en la teoría no pueden ser complementadas por más información (variables ocultas) que reduciría las probabilidades para determinar únicamente los valores (clásicos). Las propiedades clásicas no pueden ser empleadas para describir el estado cuántico.
2. *Todos los observables son clásicos.* Todo lo que podamos observar y medir se mostrará con propiedades clásicas.<sup>24</sup>

---

<sup>22</sup> Según aparece en la web en: [http://es.wikipedia.org/wiki/Interpretaci%C3%B3n\\_de\\_Copenhague](http://es.wikipedia.org/wiki/Interpretaci%C3%B3n_de_Copenhague).

<sup>23</sup> Kosso., *Appearance and Reality...* pp. 160-161.

<sup>24</sup> En el mismo sentido se expresa de la Peña, al señalar que “por “observable” deben entenderse cantidades como la intensidad de una línea de emisión, pero no variables como, por ejemplo, el momento en que el

3. *La tarea de la ciencia es describir relaciones entre observables.* Lo que separa a la ciencia del misticismo y el dogma es la insistencia en la evidencia observable. Podemos especular respecto a una realidad inobservable, pero eso no será ciencia.
4. *No podemos atribuir realidad a la función de estado o al mundo cuántico.*

Con respecto a tal proclama, Popper asegura que dicha declaración fue apoyada, pudiéramos decir, incondicionalmente por una gran cantidad de físicos que la hicieron suya, al asegurar que

[...] La concepción contraria, normalmente llamada interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica, es casi universalmente aceptada. [...] todos los físicos competentes saben que la interpretación de Copenhague es correcta (puesto que ha sido «demostrada con experimentos»<sup>25</sup>).

Hubo, sin embargo, un grupo de personalidades, liderados por Albert Einstein y Erwin Schrödinger que se opusieron al carácter probabilista subjetivista propuesto en la declaración. Popper menciona a Planck, von Laue, de Broglie Jean-Pierre Vigier, Landé, Bohm, Bunge y Bopp.<sup>26</sup>

Son históricos los encuentros de Einstein y Bohr para debatir la visión y posturas indeterminista y de completitud de la mecánica cuántica.<sup>27</sup> Si bien Bohr consideró que resistió los embates conceptuales y todos los experimentos ideales de Einstein, éste concedió que la nueva teoría cuántica guardaba –y guarda aún– una impresionante consistencia lógica interna, al decir de ella que: “[...] Es la única teoría actual que permite comprender unitariamente las experiencias relativas al carácter cuántico de los procesos micromecánicos”,<sup>28</sup> y a pesar de discrepar con que fuese una teoría conceptualmente terminada, admite que “esta teoría contiene indudablemente parte de la verdad última”,<sup>29</sup> y que la concordancia de la teoría –dotada de una gran fortaleza matemática-predictiva–

---

electrón atómico realiza la transición. Para definir los observables y sus relaciones Heisenberg usó como guía, sin embargo, la mecánica clásica y con estos elementos logró construir una nueva teoría, muy abstracta, basada en “representantes” cuánticos de las correspondientes variables clásicas, que poseen propiedades novedosas –por ejemplo, no son conmutativos–. (de la Peña., *Introducción a la...* p. 31).

<sup>25</sup> Popper., *Teoría cuántica y el cisma en...* pp. 57-58.

<sup>26</sup> *Ibid.*, pp. 58-59.

<sup>27</sup> También se conoce con el nombre de problema de la completitud de la mecánica cuántica.

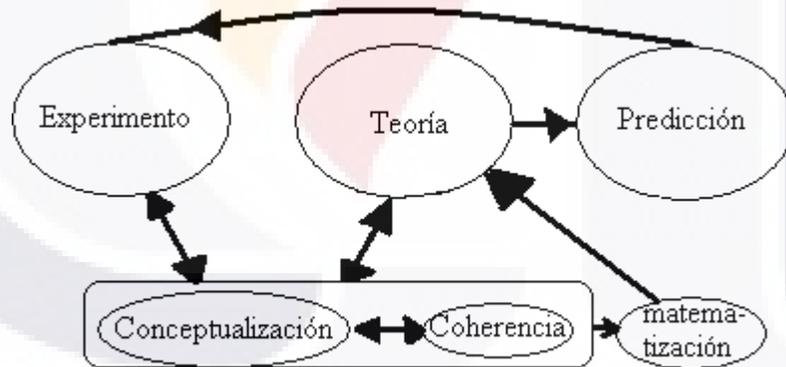
<sup>28</sup> Einstein, A. (1979): *Notas autobiográficas*; Alianza Editorial. Madrid. p. 76.

<sup>29</sup> Bernstein., *op. cit.*, p. 36. Según la entrevista (de Bernstein a Bell) y en la misma página citada aparece que: “la actitud de Einstein hacia la teoría cuántica pareció cambiar. Aparentemente aceptó su consistencia lógica, pero se negó a admitir que fuera algo más que «una parte de la verdad última».

con los hechos experimentales le han dado gran aceptación dentro de la comunidad científica, pues

Esta teoría, por un lado, y la teoría de la relatividad, por el otro, se tienen ambas por correctas en cierto sentido, aunque su fusión se ha resistido a todos los esfuerzos. Lo cual tiene seguramente que ver con el hecho de que entre los físicos teóricos actuales existen muy diversas opiniones acerca de qué aspecto tendrá el fundamento teórico de la física futura.<sup>30</sup>

Por su parte, Bohr, con el propósito de describir la naturaleza atómica propuso un viraje respecto de la manera en que se interpretaban los fenómenos en los que aparecen involucradas las partículas atómicas, apoyando la modificación *ad hoc* de las leyes que rigen el comportamiento de los sistemas clásicos al introducir la probabilidad y la estadística como elementos imprescindibles en la nueva teoría, ampliando con ello el marco conceptual de la ciencia –así fuese a costa de la explicación mecanicista-determinista tan característica de la física clásica a nivel macroscópico– y privilegiando la coherencia y la matematización sobre la comprensión y significancia física de la idea, exaltando –creo yo– la circularidad y revisión del concepto y obligándolo a seguir una trayectoria más acorde con el mundo de la experimentación:



**Figura 3.1.** Representación de los pasos a seguir en la experimentación.

Y es que Bohr argumenta que:

[...] Este descubrimiento reveló en los procesos atómicos una característica global ajena por completo al concepto mecanicista de la Naturaleza, y puso en evidencia que las teorías físicas clásicas son idealizaciones válidas para describir fenómenos en los cuales todas las acciones puestas en juego son

<sup>30</sup> Einstein., *op. cit.*, pp. 76-77.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

suficientemente grandes para permitir despreciar el cuanto de acción. Mientras que esta condición queda satisfecha en los fenómenos a escala ordinaria, en los fenómenos atómicos encontramos leyes de tipo enteramente nuevo, que se resisten a toda representación intuitiva determinista...Mediante los esfuerzos concentrados de toda una generación de físicos teóricos se desarrolló gradualmente una descripción coherente completa, y de gran alcance, de los fenómenos atómicos.  
...En correspondencia con el hecho de que procesos cuánticos individuales diferentes pueden tener lugar en un dispositivo experimental dado, estas relaciones tienen un carácter esencialmente estadístico.”<sup>31</sup>

Bohr va incluso más allá, al encontrar que la rígida conceptualización que impone y exige el modelaje clásico no sólo es inútil para describir los eventos cuánticos, sino que ni siquiera permite tener una percepción “realista” de tales objetos, pues la certidumbre no sólo es inviable en las profundidades atómicas, sino también a nivel clásico, aun cuando admitamos, por convención, que esta última teoría es estricta o fuertemente determinista, aunque formalmente no lo sea pues, para empezar, en la física sólo podemos hablar de precisión, no de exactitud –dado que ésta sólo existe como una quimera o matemáticamente–. Feynman lo explica maravillosamente al exponer que

Naturalmente que debemos poner énfasis en que la física clásica es también indeterminista en cierto sentido. Generalmente se cree que esta indeterminación, el que no podamos predecir el futuro, tiene gran importancia en la cuántica y se dice que esto explica el comportamiento de la mente, el sentimiento de libre albedrío, etc. Pero si el mundo fuera *clásico* –si las leyes de la mecánica fueran clásicas– no es completamente evidente que la mente no sentiría más o menos lo mismo. Es clásicamente cierto que si conociéramos la posición y la velocidad de cada partícula del mundo, o de una caja con gas, podríamos predecir exactamente lo que ocurriría. Y, en consecuencia, el mundo clásico es determinista. Supongamos, sin embargo, que tenemos una precisión finita y que lo único que no conocemos *exactamente* es dónde está un átomo, digamos que con un error de uno en mil millones. Luego, a medida que este átomo sigue su camino choca con otro, y como conocemos su posición, a menos de uno en mil millones, después de la colisión encontramos un error aún más grande en la posición. Y esto se amplifica, por supuesto, en la colisión siguiente, de modo que si comenzamos sólo con un error pequeñísimo, rápidamente éste se agranda hasta constituir una gran indeterminación. [...] Hablando con mayor precisión: dada una exactitud arbitraria, por más precisa que sea, podemos encontrar un tiempo lo suficientemente largo como para que no podamos hacer predicciones válidas para ese tiempo largo. [...] Ya en la mecánica clásica había una indeterminabilidad desde el punto de vista práctico.<sup>32</sup>

Pero el reclamo de Bohr cobra sentido puesto que los conceptos clásicos son insuficientes cuando se transfieren al micromundo donde, si bien es evidente la existencia de entidades individuales, persiste el enorme problema de que desconocemos cómo son en realidad, lo que nos lleva a cuestionar la significancia real de los términos usados por

---

<sup>31</sup> Bohr, N. (1968): *Física atómica y conocimiento humano*; Aguilar, S. A. de Ediciones. España. 1964. p. 88.

<sup>32</sup> Feynman, R., Leighton, R. B. & Sands, M. (1965): *Física. Volumen III: Mecánica Cuántica*; Addison-Wesley Iberoamericana, S. A.; USA. 1987. pp. 2-14 – 2-15.

la física clásica: partícula y onda, pues en las profundidades atómicas tales conceptualizaciones son inaplicables, al menos tal y como se hace en la teoría clásica. El problema que se le presenta a la mecánica cuántica no es cosa menor y es viable poner en tela de juicio si en definitiva la propuesta cuántica de partículas-ondas coexistentes es problema de la realidad o de la teoría. Si admitimos como válido el primer problema, nos encontramos, en un callejón sin salida pues no podremos acceder a ella, en este momento, para saberlo porque estamos acotados por el instrumental de medición requerido que, indudablemente, ocasionará disturbios al buscar discernir qué tipo de objeto enfrentamos. De Broglie admite esto al decir que

La necesidad de considerar, en la mecánica cuántica, el aparato de medición al mismo tiempo que el objeto atómico, indica que las abstracciones por las cuales se llegan a caracterizar las propiedades de los objetos atómicos, deben ser hechas de una manera más refinada que en la mecánica clásica, ya que en esta última se pueden despreciar por completo los medios de observación.<sup>33</sup>

Por otra parte, si el problema es de la teoría, se requeriría modificar un sinnúmero de ideas y replantear el bagaje matemático, situaciones ambas que podrían desembocar en un conjunto de entresijos difíciles, sino imposibles, de desmenuzar. Para esto último se requiere tiempo y nuevas propuestas teóricas que concuerden con los experimentos; es decir, habría que buscar cómo explicar el acontecer atómico.

Quizá sea por ello que la teoría cuántica se ha apoyado –como antes lo hiciera la mecánica estadística– en la probabilidad y estadística pues en las entrañas del micromundo las evidencias experimentales justifican el uso obligatorio de tales herramientas matemáticas, asegurando con ello que el indeterminismo impera y vuelven, hasta cierto punto, inoperantes y cuestionables las propiedades de indivisibilidad, unitarismo, distinguibilidad y demás características mecánicas propias de la propuesta clásico-einsteiniana; de hecho, Bohr así se pronuncia al decir que

[...] En esta situación no había lugar para intentar un análisis causal de los fenómenos radiantes, sino sólo, mediante un empleo combinado de las imágenes contrapuestas, para calcular las probabilidades de los diversos procesos individuales de radiación. Sin embargo, es muy importante comprender que, en estas condiciones, el recurrir a las leyes de la probabilidad difiere esencialmente en su objeto de la conocida aplicación de consideraciones estadísticas como medio práctico de explicar las propiedades de sistemas mecánicos de gran complejidad estructural. En efecto, en física cuántica no nos encontramos con complicaciones de esta clase, sino con la incapacidad del marco conceptual clásico

---

<sup>33</sup> de Broglie., *Examen de la mecánica...* pp. S<sub>29</sub>– 249-251.

para abarcar las características peculiares de indivisibilidad o individualidad que caracterizan los procesos elementales.”<sup>34</sup>

Y aun cuando Bohr después se empeñe en buscar la manera de conciliar las teorías cuántica y clásica, introduciendo el Principio de Correspondencia<sup>35</sup> como un requisito inamovible que en la frontera de lo macro y micro debe satisfacer la teoría cuántica,<sup>36</sup> le es difícil sustraerse a una posible escisión conceptual con la teoría clásica, al decir que

Este descubrimiento reveló en los procesos atómicos una característica global ajena por completo al concepto mecanicista de la Naturaleza, y puso en evidencia que las teorías físicas clásicas son idealizaciones válidas para describir fenómenos en los cuales todas las acciones puestas en juego son suficientemente grandes para permitir despreciar el cuanto de acción. Mientras que esta condición queda satisfecha en los fenómenos a escala ordinaria, en los fenómenos atómicos encontramos leyes de tipo enteramente nuevo, que se resisten a toda representación intuitiva determinista...Mediante los esfuerzos concentrados de toda una generación de físicos teóricos se desarrolló gradualmente una descripción coherente completa, y de gran alcance, de los fenómenos atómicos.<sup>37</sup>

Einstein, en cambio, se mantuvo firme en su postura, sin convencerse de que las explicaciones dadas por la mecánica cuántica –de hecho, por Bohr y los sustentantes de la interpretación de Copenhague– representarían la realidad física última, subrayando la necesidad de que el concepto-idea o concepto físico es más importante y trascendente que el concepto matematizado, y lo hizo exponiendo su inconformidad al aducir que: “La física es un esfuerzo por aprehender conceptualmente la realidad como algo que se considera independiente del ser percibido. En este sentido se habla de lo «físicamente real»”.<sup>38</sup>

Es manifiestamente abierta la proposición de Einstein acerca de la intencionalidad de la física y sus conceptos al orientarla a brindar una explicación de la realidad ya que, si bien inicialmente la teoría es descriptiva, puede irse modificando progresiva y sustancialmente hasta dar una descripción más acorde con la realidad, siguiendo la trayectoria ordinaria de la física clásica: experimento→ conceptualización→ teoría→ coherencia interna de la teoría→ predicción→ realidad.

---

<sup>34</sup> Bohr., *Física atómica y...* p. 42.

<sup>35</sup> Para Saxon: “This principle, that in the classical limit the predictions of the laws of quantum mechanics must be in one-to-one correspondence with the predictions of classical mechanics, is called *the correspondence principle*.” (Saxon., *Elementary Quantum...* p. 17).

<sup>36</sup> Para de la Peña: “Es precisamente la pequeñez de  $h$  lo que oculta el fenómeno cuántico tan pronto se sale uno de la escala atómica.” (de la Peña., *Introducción a la...* p. 6).

<sup>37</sup> Bohr., *Física atómica y...* p. 88.

<sup>38</sup> Einstein., *op. cit.*, p. 77.

Einstein reacciona también contra la proposición de que la probabilidad y la estadística –ampliamente empleados por él para dar explicación al movimiento browniano y a la teoría cuántica de la radiación– conllevan la concepción de una naturaleza de carácter no causal, al decir que “El uso de métodos estadísticos en la física teórica es sólo un recurso útil para tratar fenómenos referentes a gran número de procesos elementales, pero las leyes de éstos son estrictamente causales”.<sup>39</sup>

Y es que Einstein, al igual que Planck y Boltzmann, emplean la probabilidad como una expresión de ocurrencia causal equiprobable, adaptándola a un gran número de partículas que están sujetas, en principio, a las mismas condiciones imperantes; es decir, la probabilidad es una condición del desconocimiento de la totalidad de las causas que actúan sobre un sistema de partículas y pueden afectarlas a todas por igual, sin demérito alguno para la existencia de una explicación física confiable.<sup>40</sup>

Fue de tal magnitud la desazón que causó en Einstein la interpretación dada a la probabilidad por parte de los seguidores de la interpretación de Copenhague que le llevó a proferir, en una carta a Born, su celeberrima sentencia:<sup>41</sup> “Dios no juega a los dados con el universo”, frase que expresa su inconformidad no sólo con la nueva visión subjetiva propuesta por la mecánica cuántica, sino porque este nuevo modelo teórico incita a abandonar los eventos individuales y la causalidad estricta y suplantarlos por una interpretación estadística.

El enfrentamiento dialéctico entre Einstein y Bohr les llevó a cuestionar, inclusive, en qué consiste el conocimiento científico y cuál es la función de la ciencia. Para Einstein: “La creencia en un mundo externo independiente del sujeto que lo percibe es la base de toda la ciencia natural”;<sup>42</sup> es decir, él considera que la naturaleza es objetiva<sup>43</sup> y está allí, fuera del sujeto, que es quién la percibe y la explica, y para lograrlo echa mano de la

---

<sup>39</sup> Whitrow, G. J. (1967); *Einstein. El hombre y su obra*; Siglo XXI, Ed. México, 1990. p. 80.

<sup>40</sup> Inicialmente, Planck emplea la probabilidad y la estadística de manera clásica, al considerar la transmisión de la energía como un continuo, aunque después encontró necesario introducir la discretización como una manera de resolver el problema energético relacionado con el comportamiento de los osciladores asociados a su modelo teórico. Kuhn y de la Peña dan una excelente semblanza histórica de este hecho (*cfr.*: Kuhn, T. S. (1978): *La Teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica, 1894–1912*; Ed. Alianza Editorial. España, y: § 1.5. *Apéndice: Teoría del cuerpo negro*, en: de la Peña, L. (1959): *Introducción a la...* pp. 16-19).

<sup>41</sup> Eisberg-Resnick., *op. cit.*, p. 107.

<sup>42</sup> *Ibid.*, p. 107.

<sup>43</sup> De hecho, en este sentido se desprende que el concepto de objetividad no es más que aquella verdad exterior independiente del sujeto percibiente; es decir, la objetividad es, por decirlo de algún modo, la intersección de todas y cada una de las realidades individuales que presenta características similares para cada observador, y a su vez, son independientes de él mismo. Así, la objetividad goza de ser un concepto universal y particular, simultáneamente, pues depende del sujeto que lo percibe pero, a su vez, es independiente de él.

ciencia. Bohr opina lo contrario, pues exalta el subjetivismo al considerar que la realidad depende de cómo la aprehendemos, y principalmente, la realidad cuántica, pues para él “No hay mundo cuántico... sólo una descripción cuántica abstracta. Es erróneo pensar que la tarea de la física es averiguar cómo es la naturaleza. La física involucra lo que decimos sobre ella”.<sup>44</sup> Con ello, es evidente que la postura que Bohr asume es la de que el estudioso u observador de la naturaleza es quien la percibe y le da forma, subjetivándola, pero sin acercarse a cómo es en realidad. Aún así, Einstein considera que la mecánica cuántica no puede ser completa. Es, en todo caso, una propuesta teórica bastante solvente que explica muchos fenómenos, pero que es susceptible de modificarse en un tiempo futuro; así expone que

Mi opinión es que la actual teoría cuántica, con ciertos conceptos básicos fijos que en esencia están tomados de la mecánica clásica, representa una formulación óptima del estado de cosas. Creo, sin embargo, que esta teoría no brinda un punto de partida útil para la futura evolución. He ahí el punto en el que mis expectativas difieren de las de la mayoría de los físicos contemporáneos. Ellos están convencidos de que los rasgos esenciales de los fenómenos cuánticos (variaciones aparentemente discontinuas y temporalmente no determinadas del estado de un sistema, cualidades simultáneamente corpusculares y ondulatorias de las formaciones energéticas elementales) no pueden explicarse mediante funciones continuas del espacio para las cuales son válidas las ecuaciones diferenciales.<sup>45</sup>

Con el avance del tiempo, las controversias que se suscitaron por el planteamiento tajante –incluso dogmático, tal y como asegura Popper–<sup>46</sup> de los fundamentos de la mecánica cuántica, parecieron disminuir en intensidad –o al menos, ya no se agudizaron– subsistiendo algunas inconformidades respecto del determinismo-indeterminismo presente en la ciencia. Por ejemplo, en la actualidad, físicos de la talla de Hawking y Penrose, –aquél, declarado positivista, mientras que éste se declara platónico–<sup>47</sup> aseguran que si bien la mecánica cuántica es correcta en las dimensiones de los objetos atómicos, habría que indagar a un nivel más profundo, donde quizá podría ser superada, y retomar el determinismo subyacente en la física. Por el momento, y con el avance científico tecnológico actual, Hawking asegura que el indeterminismo es quien se avizora triunfador, aunque no excluye la posibilidad de que tal supuesto pueda modificarse. Así se expresa respecto a este tema:

---

<sup>44</sup> Whitrow., *Einstein. El hombre...* p. 177.

<sup>45</sup> *Ibid.*, Einstein. p. 83.

<sup>46</sup> Popper., *Teoría cuántica y el cisma en...* p. 67, al comienzo de sus trece tesis.

<sup>47</sup> Penrose., *Lo grande, lo pequeño y...* pp. 14-15, 133-134.

Muchos científicos son como Einstein en el sentido de que tienen un lazo emocional muy fuerte con el determinismo pero al contrario que Einstein han aceptado la reducción en nuestra capacidad para predecir que nos había traído consigo la teoría cuántica [...] Pensar que el universo es determinista, como creía Laplace, es simplemente inocente. Presiento que estos científicos no se han aprendido la lección de la historia. El universo no se comporta de acuerdo a nuestras preconcebidas ideas. Continúa sorprendiéndonos. Podría pensarse que no importa demasiado si el determinismo hizo aguas cerca de los agujeros negros. Estamos casi seguros de estar al menos a unos pocos años luz de agujero negro de cualquier tamaño pero según el Principio de Incertidumbre, cada región del espacio debería estar llena de diminutos agujeros negros virtuales que aparecerían y desaparecerían una y otra vez. Uno pensaría que las partículas y la información podrían precipitarse en estos agujeros negros y perderse. Sin embargo, como estos agujeros negros virtuales son tan pequeños (cien billones de billones más pequeños que el núcleo de un átomo) el ritmo al cual se perdería la información sería muy bajo. Esto es por lo que las leyes de la ciencia parecen deterministas, observándolas con detenimiento. Sin embargo, en condiciones extremas, tales como las del universo temprano o las de la colisión de partículas de alta energía, podría haber una significativa pérdida de información. Esto conduce a la imprevisibilidad en la evolución del universo. [...]

Se pueden calcular las probabilidades pero no hacer ninguna predicción en firme. Así, el futuro del universo no está del todo determinado por las leyes de la ciencia, ni su presente, en contra de lo que creía Laplace. Dios todavía se guarda algunos ases en su manga.<sup>48</sup>

Son igualmente notables las opiniones que de Broglie vertió en favor de un replanteamiento conceptual de la mecánica cuántica. De Broglie fue figura central de la teoría cuántica en sus inicios al conjuntar el cuanto de acción  $\hbar$ , las propiedades corpusculares y las propiedades ondulatorias de la materia en su famosa expresión:<sup>49</sup>

$$\lambda = \frac{\hbar}{p}, \text{ o bien, } p = \frac{\hbar}{\lambda} = \hbar k, \text{ con: } k = (\lambda)^{-1} \text{ ----- (7)}$$

Sin embargo, de Broglie, después de apoyar la interpretación de Copenhague, comenzó a reflexionar profundamente acerca de las objeciones planteadas por Einstein y sus seguidores, dándose a la tarea de buscar una propuesta alternativa del papel que juega el observador al interactuar con los objetos del micromundo, pensando que la postura epistémica de Einstein y sus razonamientos respecto de la objetividad de la física eran plausibles, pero sin perder de vista que la cada vez mayor cantidad de experimentos validaban y reforzaban, de manera paulatina, lo acertado del andamiaje teórico de la mecánica cuántica, promoviendo el despuntar de otra realidad inexpugnable. De Broglie considera emprender la tarea de hacer ajustes a la teoría cuántica, quizá porque las

<sup>48</sup> <http://ciencia.astroseti.org/hawking/>

<sup>49</sup> La expresión dada por de Broglie emplea argumentos de la teoría de la relatividad para demostrar que la expresión de Einstein,  $E = h\nu$ , conduce a la ecuación  $p = h/\lambda$ . Esta expresión nos dice que, de la misma manera que las ondas pueden tener carácter corpuscular, las partículas pueden tener carácter ondulatorio. Esto deja de tener vigencia a nivel macroscópico, dado el pequeñísimo valor de  $h$ .

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

objeciones de Einstein le convencieran, o tal vez por su apego a la física clásica y sus explicaciones o, inclusive, porque su intuición le llevó a sumarse a la tesis einsteniana respecto a que una teoría sólo modela –con fines explicativos– lo que acontece en la naturaleza, permitiéndonos observar lo que ella (la teoría) dicta.<sup>50</sup> De Broglie está consciente que es necesario confrontar la teoría con los experimentos para adquirir la certidumbre de que (tal teoría) es la más adecuada, e indicada, para describir y pronosticar los eventos, y en caso de satisfacer tal exigencia, sea admitida por la comunidad científica y forme parte del cuerpo teórico de la física, cerrando las puertas a cualquier posible objeción o suspicacia acerca de su validez, impacto y trascendencia, cosa que según él, no cumplía enteramente la teoría cuántica al seguir motivando la controversia respecto al cabal conocimiento de lo que dice explicar, pues

En los años siguientes al descubrimiento del cuanto de acción por Max Planck y la introducción de los fotones por Einstein y, sobre todo, en los años posteriores al descubrimiento de las ondas materiales y la formulación de la mecánica cuántica por De Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Dirac y otros físicos, se han hecho inmensos progresos en esta teoría y se han encontrado innumerables verificaciones experimentales.

No obstante estos avances, la interpretación física, y más aún la epistemológica, de la mecánica cuántica sigue siendo materia de discusión.<sup>51</sup>

Tiempo después, al proseguir con sus investigaciones y reflexiones, y como una reacción ante las posturas intransigentes –incluso, aparentemente dogmáticas– de Bohr y de Heisenberg en lo referente a un indeterminismo rampante en la física y de una idea de completud de la naciente teoría –completud que simula ser inamovible–, de Broglie añadiría que

Razonablemente podemos aceptar que la actitud adoptada, por más de 30 años, por físicos teóricos cuánticos es, al menos en apariencia, la contraparte exacta de la información del mundo atómico que nos ha dado la experimentación. Al nivel de investigación que se tiene actualmente en microfísica, es cierto que los métodos de medición, no nos permiten determinar simultáneamente todas las cantidades que serían necesarias para obtener una visión de los corpúsculos de tipo clásico (esto se puede deducir del principio de incertidumbre de Heisenberg) y que las perturbaciones introducidas por la medición, que son imposibles de eliminar, en general nos impiden predecir el resultado que producirán y permiten sólo predicciones estadísticas. Por lo tanto, la construcción de fórmulas puramente probabilísticas, que todos los teóricos usan actualmente, fue completamente justificada. Sin embargo, la mayoría de ellos, muchas veces bajo la influencia de ideas preconcebidas derivadas de la doctrina positivista, han pensado que podrían ir más allá y afirmar que el carácter incierto e incompleto del conocimiento que la experimentación, en su estado actual, nos provee de lo que realmente ocurre en

---

<sup>50</sup> Según Heisenberg, Einstein mismo le expone personalmente que «Es siempre la teoría la que decide lo que se puede observar». (Heisenberg., *Encuentros y conversaciones con Einstein...* p. 35.

<sup>51</sup> de Broglie., *Examen de la mecánica...* p. S<sub>29</sub> – 244.

microfísica, es el resultado de una indeterminación real de los estados físicos y su evolución. Tal extrapolación de ninguna manera parece ser justificada. Es posible que en el futuro, examinando a un nivel más profundo la realidad física, seamos capaces de interpretar las leyes de probabilidad y física cuántica como los resultados estadísticos del desarrollo de variables completamente determinadas que actualmente se encuentran ocultas a nosotros. Puede ser que los poderosos medios que empezamos a usar para romper la estructura nuclear y para que aparezcan nuevas partículas, nos den algún día un conocimiento directo que actualmente no tenemos a este nivel más profundo. Tratar de impedir todo intento de ir más allá del punto de vista actual sobre la física cuántica, podría ser muy peligroso para el progreso de la ciencia y además sería contrario a las lecciones que podemos aprender de la historia de la ciencia. En efecto, esto nos enseña que el estado actual de nuestro conocimiento es siempre provisional y que deben existir, más allá de lo que actualmente se conoce, inmensas regiones nuevas que descubrir.<sup>52</sup>

Asimismo, de Broglie, preocupado por la problemática que aqueja a la teoría cuántica, propone plantear un conjunto básico de variables e interrogantes que tenga como tarea principal abocarse a dar una explicación sencilla de cuáles son los hechos físicos que es imprescindible aclarar –de entre los que sobresalen el dualismo de los objetos atómicos y el papel del observador que, sin duda alguna, y al igual que en la física clásica, adquiere un papel preponderante–, de tal suerte que sienta una base conceptual más acorde a la idea de una descripción o explicación clásica, por lo que busca introducir un elemento adicional que justifique el por qué de la intromisión del indeterminismo en una ciencia exacta como la física, indeterminismo que deberá ser sometido a un riguroso escrutinio por una teoría más formalmente estructurada posteriormente; para ello expone que

Desde luego, tenemos que explicar la coexistencia de propiedades corpusculares y de propiedades ondulatorias en los objetos atómicos –como en los electrones, por ejemplo–. Esta coexistencia no puede ser explicada con base en la física clásica. Pero ¿qué significa este calificativo de “clásica”? Para ella proponemos la siguiente definición: la descripción de un fenómeno se denomina *clásica* cuando no es preciso tomar en cuenta los medios de observación, de tal modo que en dicha descripción se considere *al fenómeno como algo que se desarrolla independientemente de los medios de observación utilizados*.<sup>53</sup>

Es así que de Broglie busca una explicación alternativa en concordancia con la visión clásica, y genera modelos matemáticos con el anhelo de detallar –o simular– el comportamiento corpuscular-ondulatorio de la materia en los niveles cuánticos. El modelo de de Broglie más conocido –después de sus trabajos concernientes a las ondas de materia– es el equivalente a un modelo de flujo hidrodinámico conservativo, al que llamó “*fórmula de onda guiada*”, y cuya expresión para la velocidad de la partícula en cada punto de la trayectoria es:

<sup>52</sup> Eisberg-Resnick., *op. cit.*, p. 107.

<sup>53</sup> de Broglie., *Examen de la mecánica...* p. S<sub>29</sub>– 245.

$$\vec{v} = -\frac{I}{m} \vec{\nabla} \psi \text{ ----- (8)}$$

con:

$m$  = masa del corpúsculo,

$I$  = impuso de la partícula,<sup>54</sup> y

$\Psi$  = función de onda o perfil de la onda viajera.

La expresión<sup>55</sup> (8) pretendió mostrar

que el corpúsculo obedecería una dinámica en la que intervendría, al lado de fuerzas de tipo clásico, una fuerza cuántica derivada de un “potencial cuántico”, traduciéndose así sobre el corpúsculo la reacción del fenómeno ondulatorio extendido al cual se encontraría incorporado en calidad de región singular. Por esta razón, el corpúsculo no debería estar sometido únicamente a las fuerzas de tipo clásico que se ejercen sobre él a lo largo de la trayectoria, sin sufrir por su acción ninguna repercusión por la presencia de obstáculos que podrían encontrarse más lejos, fuera de la trayectoria. En nuestra concepción el movimiento del corpúsculo incorporado a la onda  $u$  debería sufrir además, por intermedio del potencial cuántico, la influencia de todos los obstáculos susceptibles de entorpecer la libre propagación del fenómeno ondulatorio extendido, del cual es solidario; y, naturalmente, advertíamos en esta circunstancia una posible explicación de los fenómenos de interferencia y de difracción.<sup>56</sup>

Con las expresiones anteriores de Broglie pretendía encontrar un modelo alterno que atenuara o hiciera más comprensibles las explicaciones probabilistas-subjetivistas de la mecánica cuántica, de tal suerte que los conceptos vertidos por la teoría fuesen más asequibles para los científicos de la época, cuya mentalidad estaba habituada a la certidumbre proporcionada por la física clásica; igualmente, buscaba impulsar una posible revisión de ideas y condiciones simplificadoras que llevaran a una reinterpretación del porqué del extraño comportamiento de los objetos atómicos retomando, de ser posible, algunos conceptos mecano-cuánticos para readecuarlos y hacerlos legales clásicamente, con lo que daría a la física cuántica, así fuese parcialmente, una visión objetivo-determinista y de paso eliminar el carácter, a veces ambiguo y contradictorio, de muchas

---

<sup>54</sup> Aquí, de Broglie omite el significado de  $I$ , pero por medio del análisis dimensional, es fácil deducir que  $I$  no es más que el impulso (o la fuerza neta) que actúa sobre una partícula en un intervalo de tiempo dado, es decir:  $I = \int_{t_0}^t \vec{F}(t) dt$ , que dicho de otra manera: es el cambio de la cantidad de movimiento de la partícula en un intervalo de tiempo.

<sup>55</sup> Análoga a la ecuación de continuidad para un fluido en movimiento:  $\frac{dp}{dt} + \vec{v} \cdot (\rho \vec{v}) = 0$ .

<sup>56</sup> de Broglie., *Examen de la mecánica...* p. S<sub>29</sub>– 208.

de las explicaciones respecto de los acontecimientos del micromundo.<sup>57</sup> Sin embargo, de Broglie se percata que esto no siempre es factible debido a que en la experimentación hay que considerar varios factores adicionales, de entre los que descuella la imposibilidad de llevar a cabo el estudio de cada partícula como ente individual, en vez del acostumbrado manejo de los valores promedio, característico del manejo estadístico grupal. Se ve entonces en la necesidad de apologizar a Heisenberg y su Principio de Indeterminación, y a Bohr y su manera de proceder para explicar la naturaleza subatómica, al introducir el Principio de Complementariedad como aquél elemento capaz de evitar las contradicciones teóricas internas por superponer conceptos clásicos excluyentes, al exponer

Hemos mencionado algunas de las paradojas a las cuales conduce la interpretación demasiado clásica del aspecto ondulatorio y del aspecto corpuscular de los fenómenos atómicos. La solución a estas paradojas ha sido encontrada por Bohr.

Para evitar las paradojas en cuestión, es indispensable considerar las condiciones exteriores en las cuales se encuentra el objeto atómico, lo mismo que los aparatos de medición. En todo caso, tanto las condiciones como el proceso de medición deben ser descritos de una manera clásica. [...] Jamás se puede subdividir un fenómeno atómico, porque dichos fenómenos gozan de una propiedad que podemos denominar indivisibilidad o individualidad. En efecto, para subdividir un fenómeno sería necesario modificar las condiciones exteriores y los aparatos de medición, con lo cual ya no se tendría el mismo fenómeno. Puesto que el fenómeno atómico es indivisible, únicamente se pueden tener conocimientos más precisos acerca de las propiedades de un objeto atómico, haciéndolo desempeñar algún papel en diferentes fenómenos. En otras palabras, para describir las propiedades de un objeto atómico es indispensable, como dice Bohr, hacer uso de sus aspectos contrastantes. La utilización de los aspectos contrastantes y contradictorios se encuentra regida por las relaciones de incertidumbre de Heisenberg. Y, por consiguiente, esas relaciones constituyen el único instrumento matemático de que se sirve Bohr para su interpretación de de la mecánica cuántica.

Esta situación, que se encuentra caracterizada por el empleo conjugado de los aspectos contrastantes, ha sido llamada **complementariedad** por Bohr, y las relaciones de Heisenberg han recibido el nombre de relaciones de complementariedad.<sup>58</sup>

Obviamente, fue infructuoso el modelo de de Broglie, pues los experimentos siguieron mostrando que la naturaleza exhibe comportamientos duales y discretos en los eventos subatómicos, y que la explicación más simple y accesible proviene de la mecánica cuántica.

---

<sup>57</sup> De hecho logra, en primera instancia, dar una visión más apegada a la de la física clásica pues al conjuntar la solución de la ecuación de onda de Schrödinger ( $\psi = a e^{\frac{2\pi i}{h} \varphi}$ ,  $a$  y  $\varphi$  reales) con la ecuación de continuidad, concluye que: la densidad  $\rho = |\psi|^2 = a^2$ , y:  $\rho \vec{v} = -\frac{1}{m} a^2 \nabla \varphi$ , que es la ecuación de onda guiada. (de Broglie., *Examen de la mecánica...* p. S<sub>29</sub>–209).

<sup>58</sup> *Ibid.*, pp. S<sub>29</sub>–246-247.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

A pesar de eso, de Broglie siguió cuestionando el indeterminismo subyacente en los preceptos fundamentales de la naciente teoría, especulando si la “propiedad” del dualismo en el comportamiento de los objetos atómicos no es la responsable de la indeterminación de las variables conjugadas (posición-momento lineal, energía y tiempo, etc). De Broglie cuestiona, presumiblemente, con la convicción de que la naciente teoría es susceptible de modificarse y continuar con la tradición determinista que la física ha llevado a cuevas a través del tiempo. Se preocupa también porque “la teoría cuántica de los campos es demasiado formal y poco descriptiva, y por esta razón nos parece posible que acaba por hacerse estéril”.<sup>59</sup> Pero en determinados momentos, de Broglie asume una postura platónica al pregonar, como muchos colegas contemporáneos y otros que le antecedieron, que una física altamente efectiva y descriptiva es aquella que tiene como respaldo un lenguaje matemático simple y claro, por lo que anhela restablecer el isomorfismo de la teoría clásica entre el concepto físico y la expresión simbólica para dotar a la teoría de formalidad y fortaleza, a la par de la consabida sencillez conceptual; pero esto lo hace pues no transige con la implantación de una teoría algorítmica basada únicamente en la matemática y en la que los ‘observables’ no son magnitudes mensurables ciertos, sino tan sólo probables. Esto, para de Broglie es motivo de conflicto pues atenta contra el realismo-materialismo de la física clásica, por lo que asume la postura de que la dualidad y la consecuente inconmensurabilidad, más que ser una característica propia de las entidades microscópicas, consiste en un problema epistémico. Así, lucha denodadamente por reinstaurar la proverbial visión ideográfica de la física, aunque acompañada por la probabilidad clásica, pues comulga con esta última idea. De Broglie continuamente insiste en reinterpretar la probabilidad que subyace en la teoría cuántica, pues ello reimplantaría la objetividad de la física y se haría de lado el subjetivismo de la mecánica cuántica, instaurado por la interpretación de Copenhague; esto le orilla a decir que:

Las nociones matemáticas utilizadas en la mecánica cuántica y las nociones físicas a las cuales se refiere son, no obstante, indispensables para la discusión del aspecto epistemológico del problema. En este punto no estamos de acuerdo con Bohr, quien trata el formalismo matemático de la mecánica cuántica como algo puramente simbólico. Indudablemente es cierto que una teoría matemática opera siempre con símbolos; pero, en la física teórica, dichos símbolos corresponden a nociones físicas bien determinadas. Y esto es aplicable tanto a la teoría cuántica como a la teoría clásica. En el caso de la teoría clásica representan las magnitudes físicas mismas; mientras que en la teoría cuántica representan sobre todo probabilidades. Y es importante precisar de qué clase de probabilidades se trata: son las

---

<sup>59</sup> *Ibid.*, p. S<sub>29</sub> -242.

probabilidades de los hechos que pueden ser verificados en lenguaje clásico y, en particular, los resultados de la medición de una magnitud física. Estas probabilidades tienen valores bien determinados, cuando las circunstancias experimentales se encuentran bien determinadas.

El concepto de probabilidad de un hecho que es virtualmente posible, es un concepto primario que constituye la base de la descripción cuántica de los fenómenos físicos. Y cualquier interpretación racional de la mecánica cuántica debe estar fundada sobre esta base.

[...] El concepto fundamental del estado cuántico de un sistema atómico sólo puede ser definido apoyándose en la noción de probabilidad de los hechos virtualmente posibles en circunstancias físicas diferentes –que corresponden a los “aspectos contrastantes del fenómeno”–.<sup>60</sup>

Pero también, y reflexionando acerca de la crítica situación que la física afronta al pretender dar una descripción confiable y profunda de los fenómenos atómicos, exalta la postulación de la dualidad pues, por el momento, es la única idea que evita la contradicción de que propiedades excluyentes –desde el punto de vista de la física clásica– sean características inherentes a los objetos atómicos. De manera simultánea, pone en la mesa de discusión el problema de la localización del corpúsculo, pues si el objeto atómico se comporta como una onda ¿el corpúsculo existe necesariamente, y de manera simultánea, a lo largo del frente de onda? O bien, a la hora de interactuar ¿cómo se encuentra en un sólo sitio, sin que se perciba un comportamiento corpuscular en las vecindades de tal región? ¿No atentan estas ideas contra el sentido común? ¿O acaso la probabilidad permite tal comportamiento? De Broglie opina que

La complementariedad de Bohr está relacionada con los distintos aspectos clásicos de un fenómeno atómico y, efectivamente, el empleo de esta noción constituye el único medio de evitar la contradicción entre esos diferentes aspectos –por lo menos, si nos limitamos a hacer la interpretación clásica de un fenómeno, considerándolo como algo que ocurre por sí mismo, independientemente de los medios usados para verificarlo–.<sup>61</sup>

Y

Las objeciones más poderosas que se han podido plantear en contra de la interpretación de la mecánica ondulatoria admitida en la actualidad, son las que se refieren al problema de la no-localización del corpúsculo. Efectivamente, en esta interpretación se admite que si el estado de nuestros conocimientos sobre un corpúsculo está representado por un tren de ondas  $\psi$  extendido, entonces el corpúsculo se encuentra presente en todos los puntos de dicho tren de ondas, con una probabilidad igual a  $|\psi|^2$ . Esta presencia podría ser calificada de “potencial”, y únicamente en el momento en que comprobamos la presencia del corpúsculo en un punto del tren de ondas, mediante una observación, es cuando esta potencialidad se actualiza, para emplear el lenguaje de algunos filósofos. Una concepción semejante tropieza con las dificultades que han sido señaladas con tanto vigor y de diversas maneras por Einstein y Schrödinger.<sup>62</sup>

---

<sup>60</sup> *Ibid.*, pp. S<sub>29</sub> – 247-248.

<sup>61</sup> *Ibid.*, p. S<sub>29</sub> – 247.

<sup>62</sup> *Ibid.*, p. S<sub>29</sub> -200.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Aquí se debe hacer hincapié en que aparecen de manera explícita los medios de observación, cosa que no ocurre en los fenómenos estudiados clásicamente, donde de Broglie asegura que se introduce tal vocablo (los medios de observación) porque se alude al fenómeno estudiado con un aspecto físico en vez de resaltar el aspecto psicológico –es decir, que no interesa la percepción del evento por el sujeto, sino su comprobación objetiva–. Asimismo, asegura

La necesidad de considerar, en la mecánica cuántica, el aparato de medición al mismo tiempo que el objeto atómico, indica que las abstracciones por las cuales se llegan a caracterizar las propiedades de los objetos atómicos, deben ser hechas de una manera más refinada que en la mecánica clásica, ya que en esta última se pueden despreciar por completo los medios de observación.<sup>63</sup>

Veamos ahora si la descripción clásica así definida es aplicable a un haz de electrones que cae sobre un diafragma provisto de dos orificios. Por supuesto, es indiferente que hagamos la experiencia con un haz de electrones o que hagamos una serie de experiencias, utilizando en cada una de ellas un solo electrón; ya que, en todo caso, el fenómeno de interferencia seguirá siendo el mismo. Si nos atenemos a la descripción clásica, no podremos aplicar a este fenómeno la imagen ondulatoria, ni tampoco la imagen corpuscular. [...] Si se hace la prueba de considerar a la función ondulatoria cuántica como algo análogo a un campo clásico, entonces surge otra clase de paradojas. Cuando se comprueba la presencia del electrón en un lugar –por medio de una mancha en una placa fotográfica, por ejemplo–, la función ondulatoria se destruye instantáneamente en todas partes, mientras que el campo clásico solamente puede cambiar propagándose de un punto a otro con una velocidad inferior a la de la luz. El cambio brusco de la función ondulatoria es denominado, algunas veces, reducción de un paquete de ondas.

La misma suposición de que un objeto atómico se encuentra siempre –esto es, independientemente de la posibilidad de comprobarlo– en algún estado cuántico determinado, conocido o desconocido por nosotros, conduce a varias dificultades. Desde luego, dicha suposición –que equivale a suponer que el objeto atómico posee siempre una función ondulatoria– entraña la paradoja considerada por Bohr, en su respuesta a Einstein, Podolski y Rosen. La paradoja consiste en el hecho de que el estado cuántico de un sistema tendría que depender de las observaciones realizadas sobre los objetos no pertenecientes al sistema.<sup>64</sup>

Con el transcurso del tiempo, y aun cuando reconoce y valora las ideas de Bohr y de Heisenberg, la visión de de Broglie converge paulatinamente a la visión einsteniana, al proclamar que la física genera modelos con la pretensión de explicar la realidad última y ésta es, de acuerdo a los preceptos clásicos, determinista. Y si bien la física cuántica emplea conceptos de carácter estadístico-probabilista que asumen un rol estelar en el *corpus* teórico, pueden deberse más a la ignorancia que al comportamiento real de un objeto atómico; es la lucha por retornar a la visión clásica de la probabilidad y hacer a un lado la interpretación subjetivista lo que lleva a decir a de Broglie que

---

<sup>63</sup> *Ibid.*, pp S<sub>29</sub>– 249-250.

<sup>64</sup> *Ibid.*, pp. S<sub>29</sub>– 245-246.

Las leyes de probabilidad de la mecánica ondulatoria nos dicen que, si se hace en París una experiencia con la caja  $B_1$ , que permita descubrir la presencia del corpúsculo en esa caja, entonces la probabilidad para que esta experiencia produzca un resultado positivo es  $|C_1|^2$ , mientras que la probabilidad de que se obtenga un resultado negativo es  $|C_2|^2$  [...] *Esta manera de considerar el problema no nos parece admisible.* La única interpretación razonable parece ser la siguiente: antes de la experiencia de localización, el corpúsculo se encontraba en una de las dos cajas  $B_1$  o  $B_2$ , *pero nosotros ignorábamos en cuál de ellas y, por lo tanto, las probabilidades consideradas por la mecánica ondulatoria usual traducen esta ignorancia;* después, si nosotros lo descubrimos en la caja  $B_1$ , es que el corpúsculo estaba allí, y si no podemos encontrarlo en dicho compartimento, es que el corpúsculo estaba en la caja  $B_2$ . Entonces todo se pone en claro, porque volvemos a la interpretación clásica de la probabilidad, cuya intervención resulta de nuestra ignorancia. Sin embargo una vez que se admite este punto de vista, parece que la descripción del corpúsculo por medio de la onda  $\psi$ , aunque nos conduce a una interpretación perfectamente exacta de las probabilidades, no nos ofrece una descripción completa de la realidad física, puesto que el corpúsculo debe tener una localización antes de la experiencia que lo descubre, y dado que la onda  $\psi$  no nos dice nada a este respecto.<sup>65</sup>

Pero estas ideas colisionan directamente con las ideas defendidas por los sustentantes más recalcitrantes de la interpretación de Copenhague, y principalmente, con las ideas de Heisenberg, que a su vez, revira con un argumento de gran fortaleza lógica, al exponer que, evidentemente, es más factible llegar a conclusiones erróneas si se parte de parte premisas erróneas. Heisenberg, con un sencillo argumento, es capaz de capear las tempestades, proponiendo

No hemos supuesto que la teoría cuántica, en forma opuesta a la teoría clásica, sea esencialmente una teoría estadística, en el sentido de que de los datos exactos sólo se puedan obtener conclusiones estadísticas... En la formulación de la ley causal, a saber, si sabemos el presente exactamente, podemos predecir el futuro, no es la conclusión sino la premisa la que es falsa. No podemos saber, como cuestión de principio, el presente en todos sus detalles.<sup>66</sup>

Empero, de Broglie se empeña en replantear el entramado conceptual mecano-cuántico, hurgando sus entresijos más oscuros y menos comprensibles y buscando dar una interpretación más clara a las ideas, seguro de que las premisas vigentes (contemporáneas a él) y absolutistas debían modificarse, subrayando la necesidad de revisar el principio de Heisenberg y la limitación que impone cuando se pretende acceder a una descripción más profunda de las partículas atómicas para obtener sus características esenciales, pudiendo homologarlas con los preceptos clásicos, y estudiarlas con mayor detenimiento, pues en caso de no hacerlo, se corre el riesgo inminente de una re-conceptualización del acontecer cuántico. Por tal motivo enuncia

<sup>65</sup> *Ibid.*, pp. S<sub>29</sub>-200 y S<sub>29</sub>-201.

<sup>66</sup> Eisberg-Resnick, *op. cit.*, p. 107.

Pero no es necesario, en manera alguna, limitarnos a los aspectos clásicos del fenómeno y al “empleo conjugado de los aspectos contrastantes”, que se encuentra limitado por las relaciones de Heisenberg. En realidad, dichas relaciones no abarcan todo el dominio de la mecánica cuántica; ya que simplemente expresan los límites de la descripción clásica y no dicen nada acerca de los medios que posee la descripción cuántica.<sup>67</sup>

Y

Las experiencias que sirven para verificar la relación de Heisenberg respecto de la energía y el tiempo, conducen a situaciones más complicadas [...] La cuestión realmente esencial es la posibilidad de llevar a cabo la experiencia de *diferentes maneras*. Cada una de estas maneras permite encontrar –repetiendo la experiencia– la distribución de las probabilidades para determinada magnitud física o, más bien, verificar la distribución teórica de esas probabilidades. De acuerdo con la mecánica cuántica, dichas distribuciones se expresan paramétricamente, por así decirlo, por medio de una sola función ondulatoria. [...] Esto quiere decir que, introduciendo la noción del *estado cuántico de un sistema* por su función ondulatoria, se puede *hacer abstracción de la última etapa de la experiencia*. Esto implica que la noción del estado cuántico de un sistema se encuentra conectada con aquello que es virtualmente posible y no a lo que ha ocurrido. La función ondulatoria nos ofrece el modo de calcular, partiendo de los hechos dados, las probabilidades de los otros hechos que son virtualmente posibles.

Aceptando este punto de vista se comprende fácilmente que la introducción de un nuevo hecho realizado entraña un cambio brusco de la función ondulatoria. Dicho cambio corresponde a una alteración de los datos en un problema de probabilidades y, por consiguiente, es un procedimiento lógico y no físico. [...] Por otra parte, este punto de vista no tiene nada de subjetivo, incluso cuando se define el objeto de la física atómica como el estudio de las relaciones entre el hombre –como experimentador ideal– y un sistema atómico. Para nosotros, tanto el experimentador ideal como el sistema atómico pertenecen al mundo exterior y objetivo. El experimentador ideal puede ser sustituido, incluso, por un aparato de medición –un registrador ideal– capaz de verificar y registrar los hechos en el sentido clásico. Como los hechos son objetivos, y también lo son las leyes por medio de las cuales se calculan las probabilidades, entonces una teoría que opere con los hechos y las probabilidades resultantes de ellos, es completamente objetiva en su conjunto.<sup>68</sup>

Por otra parte, la postura de Broglie acerca de la causalidad queda manifiesta al confrontar sus ideas con las de Bohr, y no distan mucho entre sí, puesto que, al tratar de clarificar qué entienden ambos científicos por el término “causalidad” se llega a la conclusión de que, si bien inicialmente diferían por la postura bohriana de la causalidad y su relación con el principio de complementariedad, al final parece ser que los dos admiten la causalidad como una relación causa-efecto, sosteniendo la tesis de que tal relación subyace en la naturaleza y aparece por el sólo hecho de introducir el tiempo como una coordenada indispensable y necesaria para la explicación de un evento cualesquiera, incluyendo los de carácter cuántico. Por ello, expresa

---

<sup>67</sup> de Broglie., *Examen de la mecánica...* p. S<sub>29</sub>– 247.

<sup>68</sup> *Ibid.*, pp S<sub>29</sub>– 249-251.

En los trabajos anteriores de Bohr, la noción de “complementariedad” que él introducía era opuesta a la noción de “causalidad”. Bohr decía que la causalidad no tenía lugar dentro de la física cuántica. Sin embargo, dicha afirmación no tenía un significado muy preciso. Para precisarla, era necesario definir en primer término lo que se entiende por causalidad, ya que esta palabra se emplea en dos o más sentidos diferentes. Por lo tanto, vamos a tratar de precisar las nociones correspondientes.

Se podría conservar el término de *causalidad* para la relación existente entre la causa y el efecto. La tesis de que la causa debe preceder al efecto no puede ser puesta en duda y, en ese sentido, tiene numerosas aplicaciones, particularmente en la teoría cuántica. Esta tesis se encuentra conectada con la definición del pasado y del futuro; definición que es precisada justamente en la teoría relativista del espacio-tiempo. Por consiguiente, no cabe duda de que la noción de causalidad –en el sentido que acabamos de precisar– sigue siendo aplicable en la física cuántica.<sup>69</sup>

Así, de Broglie distingue entre el determinismo clásico y el determinismo “natural”, entendiendo este último como aquél que considera insoslayable la relación de causa-efecto. Para de Broglie esto debe puntualizarse con todo rigor, dado que el determinismo laplaciano o determinismo matemático de la física clásica –expresado con elegancia y sencillez por medio de las ecuaciones diferenciales y la unicidad de sus soluciones– que posibilita hacer predicciones (o retrodicciones) precisas del comportamiento de un sistema bajo estudio (sistema macroscópico y a bajas velocidades, comparadas con la de la luz) en la mecánica cuántica deja de ser válido al aparecer las probabilidades en el estudio del sistema, obligando al observador a distinguir entre lo que ha sido posible y lo que ha sido realizado. Por lo tanto, para él es evidente que el determinismo de la mecánica cuántica no es el determinismo clásico, y eso debe ser claro. Lo expresa con toda propiedad al decir

Si entendemos por determinismo solamente el determinismo laplaciano, entonces se puede decir que en la mecánica cuántica no se cumple el determinismo, pero que la causalidad se mantiene en todo su vigor. Este es justamente el punto de vista adoptado por Bohr en su memoria de 1968 en donde hace la distinción entre la causalidad y el determinismo y, por ende, únicamente impone a la complementariedad el determinismo, pero no la causalidad.

[...] La interpretación epistemológica de la mecánica cuántica, fundada en los principios que hemos enunciado con anterioridad, se encuentra perfectamente de acuerdo con el punto de vista realista de la filosofía, sin que tenga nada que ver con el positivismo.<sup>70</sup>

### 3.3 Opinión de Popper acerca de PIH

Popper, al hablar de la mecánica cuántica, en su quinta tesis,<sup>71</sup> asegura que las conocidas fórmulas de Heisenberg

<sup>69</sup> *Ibid.*, pp. S<sub>29</sub> – 252-253.

<sup>70</sup> *Ibid.*, p. S<sub>29</sub> – 254.

<sup>71</sup> Popper., *Teoría cuántica y el cisma en...* p. 73.

$$\Delta E \Delta t \geq h \text{ ----- (9)}$$

y

$$\Delta p_x \Delta x \geq h \text{ ----- (10)}$$

únicamente son expresiones de carácter estadístico que se han malinterpretado por la mayoría de los físicos que estudian la mecánica cuántica al considerarlas expresiones que acotan la precisión de las mediciones de los eventos atómicos.

Para Popper las expresiones (9) y (10) solamente “establecen ciertos límites inferiores a la dispersión estadística de los resultados de sucesiones de experimentos: son relaciones estadísticas de dispersión. Por ello limitan la precisión de ciertas predicciones individuales”.<sup>72</sup> Asegura también que tales expresiones –aun cuando sean correctas en su manejo operativo– al ser de naturaleza estadística acarrear los mismos errores de interpretación de la probabilidad y la estadística, pudiendo ser interpretadas de acuerdo al observador, adquiriendo la posibilidad de ser objetivas o subjetivas. Inclusive, se da a la tarea de demostrar que tales ecuaciones pueden ser re-escritas como:  $\delta E \Delta t \ll h$  y  $\delta p_x \Delta x \ll h$ , donde  $\delta E$  y  $\delta p_x$  no son más que los errores experimentales asociados a la medición, sólo cumpliendo con el requisito de que  $\delta E \ll E$ , y lo mismo debe cumplirse para el momentum lineal  $p_x$ , es decir, que  $\delta p_x \ll p_x$ .

Pero, si bien lo que propone Popper es viable, no es válido exigirlo en una expresión como la del principio de incertidumbre puesto que se tendría un cociente, y si el numerador es constante y el denominador disminuye, entonces el cociente diverge, es decir, la expresión nos quedaría, por ejemplo, como:

$$\Delta x = \lim_{\delta p_x \rightarrow 0} \left( \frac{h}{\delta p_x} \right) = \infty$$

lo que muestra que la petición de Popper no se cumple así de sencillo como lo propone. Para que se cumpliera la exigencia del filósofo, el principio debería estar expresado como una suma (o resta) o un producto de variables que nos dieran como resultado un término variable, es decir:

---

<sup>72</sup> *Ibid.*, p. 74.

$$\Delta z = \Delta x \Delta p_x, \text{ donde } \Delta z \neq \text{constante}.$$

Ahora bien, por otro lado, el principio está relacionado con la dualidad de imágenes, por lo que ya no es tan sencillo asumir la tesis de Popper acerca de la precisión. De hecho, para Hacking, el problema no sólo de dicho principio, sino de la mecánica cuántica en general radica en la proposición de una naturaleza subatómica dual, puesto que no se sabe a ciencia cierta si tal proposición simplifica o complica el modelaje. Esto, arguye, se debe a que con los modelos de la física clásica se pretende explicar un acontecer ignoto, como el del mundo cuántico, pudiendo dar lugar a otro tipo de problemas, incluso, nomológicos.

Y es que la mecánica cuántica, a todas luces, parece contradecir la experiencia, no sólo en lo que se refiere a la predicción certera de los sucesos, sino también porque, mientras que para la física clásica los eventos analizados son de carácter macroscópico y continuo, en la física cuántica ondea, por todo lo alto, el pendón de la discretización de la materia. Esto sin duda, nos lleva a inquirir si es la propia naturaleza la que se comporta como lo hace o si somos nosotros quienes asignamos, dada nuestra atribución de observadores, un modelo descriptivo que impele tal comportamiento “extraño”. Es el primer caso el que causa desazón, puesto que esto nos llevaría a asumir que nos enfrentamos a una naturaleza a la que dotamos de consciencia y de poder de decisión, capaz de antelar las circunstancias experimentales que debe afrontar y con plena decisión de optar cómo comportarse frente a ellas, asumiendo el papel de corpúsculo o de onda.

### 3.4 Conclusiones

En el desarrollo de esta unidad hemos visto como Heisenberg, al intentar “establecer una base para la mecánica cuántica teórica, fundada exclusivamente en relaciones entre cantidades que sean, en principio, observables”,<sup>73</sup> busca la manera de abordar la fenomenología cuántica, haciéndolo inicialmente mediante los lineamientos habituales de la física clásica, aunque prontamente los desecha al percatarse de que es inútil tanto para describir los fenómenos cuánticos –al imposibilitar ir hasta los niveles atómico– como para

---

<sup>73</sup> Fernández-Rañada, A. (2004): *Ciencia, incertidumbre y conciencia. Heisenberg*; Serie: Científicos para la Historia; Nivola libros y Ediciones, S. L.; España. p. 59.

permitir bosquejar una imagen representativa del átomo. Es por tal motivo que opta por un modelaje solamente matemático que sostenga, al menos, una teoría meramente operativa, ante el problema que representan los inobservables.

Es entonces cuando –al alimón con Bohr, y posteriormente con Born– asume el reto de imponer un conjunto de leyes lógicas sustentadas en evidencias experimentales, aun cuando estas leyes sean indemostrables, cosa que no ocurre con las leyes de Newton y las ecuaciones de Maxwell, por ejemplo. Tales leyes se cimentaron en conceptos elegantes, aunque abstractos, como son las funciones de estado, que contienen información del sistema de naturaleza esencialmente estadística; o como los observables, que proporcionan los atributos cuantificables del sistema y/o del proceso de observación.

Es en este sentido que la física cuántica ha modificado el concepto de verdad, al ser, de acuerdo con Lakatos, una teoría netamente empirista que propaga la verdad, en este caso matemática, desde su base hacia arriba, llegando así hasta sus postulados; pudiendo asegurar que se trata de una teoría inductivista probabilista, puesto que se basa sólo en principios verificables.<sup>74</sup>

Esto la ha conducido a implantar como uno de sus principales ejes el Principio de Indeterminación de Heisenberg, que a su vez nos llevará a averiguar en los siguientes capítulos si efectivamente el límite inferior que nos impone dicho principio en el proceso de medición, el cuanto de acción, está relacionado con la incertidumbre experimental o con el indeterminismo filosófico. Me parece que, de entrada, dicho principio está más relacionado con la incertidumbre<sup>75</sup> que con el indeterminismo, pues sería ilógico generar modelos y teorías que no busquen predecir los eventos. La teoría clásica en eso ha basado su éxito pues la certidumbre, creo, debe ser una de las finalidades de todo modelo explicativo o descriptivo.<sup>76</sup> Es en tales aspectos donde se presenta el conflicto y discrepancia entre las teorías clásica y cuántica. Es bastante consolador que a pesar de toda la polémica generada por los apologistas de una y otra teoría, haya consenso de que bajo el principio de correspondencia ambas teorías concuerdan en los resultados.

---

<sup>74</sup> Lakatos, I. [1981]: *Matemáticas, ciencia y epistemología*. Alianza Universidad, pp. 15-18.

<sup>75</sup> Se refiere al Principio de Incertidumbre de Heisenberg.

<sup>76</sup> De hecho, y tal como puntualiza Stephen Hawking, la mecánica cuántica es determinista en sí misma, y es posible que el error consista en que tal vez no existan posiciones y velocidades de partículas, sino sólo ondas. Se trata simplemente de que intentamos ajustar las ondas a nuestras ideas preconcebidas de posiciones y velocidades. El mal emparejamiento sería, entonces, la causa de la aparente impredecibilidad. (Tomado de [http://es.wikipedia.org/wiki/Relaci3n\\_de\\_indeterminaci3n\\_de\\_Heisenberg](http://es.wikipedia.org/wiki/Relaci3n_de_indeterminaci3n_de_Heisenberg)).

## Capítulo 4

### Dos teorías

La teoría cuántica continúa siendo un misterio impenetrable para sus propios creadores, según ellos mismos admiten.

H. Thirring

#### Introducción

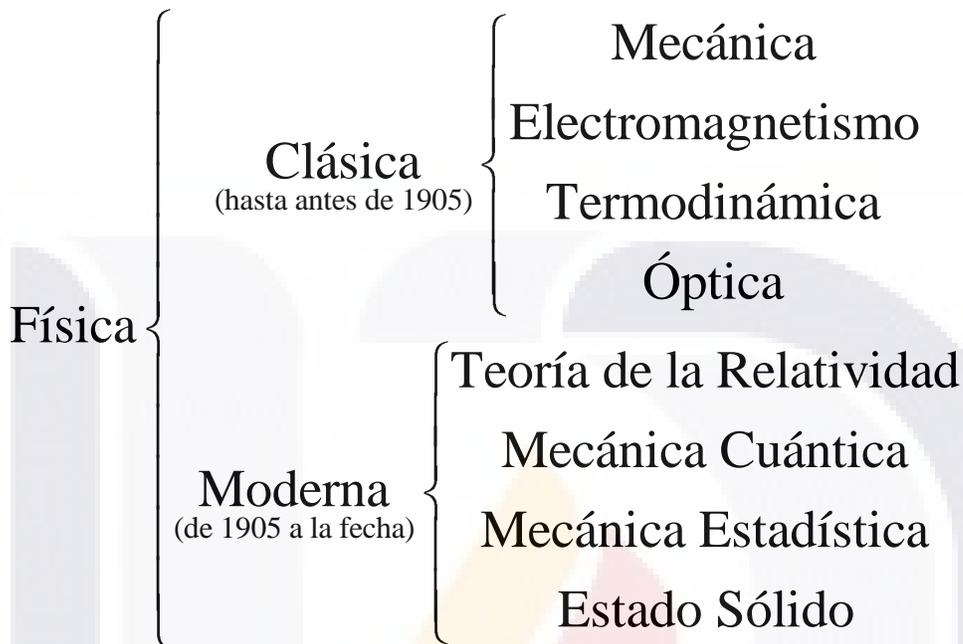
A partir de la favorable acogida que recibió la ecuación de Schrödinger y su firme propósito por explicar el devenir atómico eliminando las discontinuidades, y aún a pesar de la introducción de la probabilidad como elemento obligatorio, se pensó que el entramado conceptual de esta área de la física comenzaba a cobrar una claridad intrínseca cada vez más solvente; pero tal perspectiva teórica distó mucho de ser la verdadera solución, pues hubo un conjunto de experimentos que no fueron explicados satisfactoriamente por dicha ecuación. No obstante, la trascendencia conceptual de la ecuación de Schrödinger es indudable, de tal suerte que a partir de su aparición, en 1926, se gestó el nacimiento de lo que ahora se denomina mecánica cuántica moderna con una estructura teórica que mantiene una imbricación lógicamente articulada, coherente y exenta de contradicciones internas, que incluso le ha llevado a ser axiomatizada. La ecuación de Schrödinger exhibe la indisociable relación que existe entre un corpúsculo y una onda, relación que queda limitada por el principio de indeterminación de Heisenberg.

En este capítulo se expone una breve semblanza histórica de la génesis de la ecuación de Schrödinger, así como algunas de sus posibles consecuencias filosóficas.

#### 4.1 Antecedentes

Tal y como se mencionó en los capítulos previos, la mecánica cuántica, junto a la teoría de la relatividad, ocasionó un cisma en la física, propiciando con ello una subdivisión en

este campo de conocimiento. Dicha división podría ejemplificarla esquemáticamente como:<sup>1</sup>



**Figura 4.1.** División de la física a partir de 1905, año en que aparece la Teoría de la Relatividad.

Ahora bien, como se señaló en un capítulo anterior,<sup>2</sup> y abusando un poco de la terminología empleada por Kuhn en *La Estructura de las Revoluciones Científicas*,<sup>3</sup> la mecánica cuántica está catalogada como una de las revoluciones en la ciencia que surge a partir de experimentos inexplicados que a finales del siglo XIX condujeron a un replanteamiento conceptual de la física clásica; los recientes experimentos cimbraron

<sup>1</sup> Aquí aparece el año de 1905 –en vez de 1900, año en que aparece el trabajo de Planck–; la razón es que 1905 es el año en que aparecen publicados en *Annalen der Physik* los artículos: *On energy quanta*; *On Brownian motion*; *On mass-energy equivalence*, y *On the special theory of relativity*, todos ellos de Albert Einstein. Así pues, tal año es crucial para fijar el nacimiento de la “nueva física”, como también suele llamársele a la física moderna. La mecánica estadística y el estado sólido las incluyo por ser cruciales, la primera, para la explicación de los sistemas termodinámicos a nivel molecular, mientras que la segunda lo es para el desarrollo tecnológico.

<sup>2</sup> Cfr. Capítulo 3.

<sup>3</sup> Kuhn, T. S. (2006): *La Estructura de las Revoluciones Científicas*; FCE; México.

brutalmente los cimientos del elegante palacio en que se había constituido la física newtoniana (la ciencia normal de ese entonces), al poner a prueba la verdadera capacidad teórica que presumía poseer.

Y es que los experimentos que involucraban las entidades del microuniverso fueron apareciendo paulatinamente, desafiando las explicaciones que la física proporcionaba al intentar resolverlos, convirtiéndose en verdaderos ‘crucigramas’ conceptuales que tornaban insuficientes y complejas las propuestas clásicas de resolución. La otra “anomalía teórica”, claramente, sería la teoría de la relatividad.

Los experimentos que condujeron al alumbramiento de estas ‘nuevas físicas’ –y principalmente a la teoría cuántica– constituyen las anomalías teóricas kuhnianas, pues

[...] La ciencia normal se extravía una y otra vez, y cuando ello ocurre, esto es, cuando la profesión ya no puede hurtarse durante más tiempo a las anomalías que subvierten la tradición corriente de la práctica científica, entonces comienzan las investigaciones extraordinarias, que finalmente llevan a la profesión a un nuevo conjunto de compromisos, a una nueva base sobre la cual practicar la ciencia. Los episodios extraordinarios en los que se produce un cambio en los compromisos profesionales se conocen [...] como revoluciones científicas. Se trata de los episodios destructores-de-la-tradición que complementan a la actividad ligada a-la-tradición de la ciencia normal.<sup>4</sup>

La teoría de la relatividad y la mecánica cuántica se han ganado a pulso la denominación de revoluciones científicas, y aun cuando ocurrieron en el seno de la física, indudablemente han impactado el conocimiento científico en general. En particular, la mecánica cuántica y su visión acerca del micromundo, su estructura y entresijos teóricos, han sido cuestionadas una y otra vez no nada más por personalidades ajenas a tal campo de conocimiento –que por otra parte, podrían contribuir grandemente al hacer señalamientos válidos y/o verosímiles acerca del proceder de los científicos–, sino también por los mismos físicos. Y a pesar de que ha resistido prácticamente todos los embates de sus detractores, no ha dejado de atraer las inquisitivas miradas de los filósofos –que hurgan con vehemencia en su complejo intríngulis conceptual– a la vez que concita dudas y críticas respecto de la veracidad de sus propuestas. Popper por ejemplo, expone –aunque no sé si con un dejo de falsa modestia o de amarga ironía– que

Si un simple filósofo, como yo, se opone a un dogma dominante, como éste, debe esperar no sólo represalias, sino incluso ridículo y desprecio. Puede muy bien ser amedrentado (aunque me alegra recordar la amabilidad y paciencia con que me trató Niels Bohr) con la aserción de que todos los

---

<sup>4</sup> *Ibid.*, p. 64.

físicos competentes saben que la interpretación de Copenhague es correcta (puesto que ha sido «demostrada con experimentos»).<sup>5</sup>

Y es que Popper cuestiona algunas partes de la mecánica cuántica, tal vez deseando clarificarlas pues, a su entender, debieran modificarse por haberse erigido en un profundo problema epistémico; no obstante, y pese a autodeclararse indeterminista,<sup>6</sup> busca atenuar su intromisión en esta área pretendiendo, si no congraciarse con los físicos, al menos no causar animadversiones,<sup>7</sup> al decir que

Es seguro que mi tentativa, algo audaz, de abordar uno de los problemas centrales de la física por medios filosóficos o lógicos ha de despertar la desconfianza del físico. Admito que su escepticismo es saludable y que su desconfianza tiene fundamento; y con todo, tengo cierta esperanza de llegar a vencer uno y otra.<sup>8</sup>

Pero por otra parte, también es cierto que fustiga a los suscriptores de la declaración de Copenhague, al exponer con cierta dureza

A los críticos de la interpretación de Bohr y de Heisenberg de la teoría cuántica se les descarta, por lo general, como reaccionarios que suspiran por los viejos tiempos –los tiempos de la física clásica– los tiempos en que las teorías no eran abstractas, sino que era posible formarse una imagen mental con ayuda de modelos mecánicos; y los tiempos del determinismo. Por tanto, supongo que conviene que repita que admiro ardientemente las nuevas ideas, sobre todo en física, incluidas las que no han tenido éxito. También estoy convencido de que el carácter «abstracto» de una nueva teoría no es un argumento en contra suya.<sup>9</sup>

Y más aún

Desde el otoño de 1934 [...] ha habido muchas discusiones sobre el problema de interpretar el formalismo de la teoría cuántica. Sin embargo, no creo que se haya progresado mucho [...] Un aspecto notable de esas discusiones fue el desarrollo de una división en física. Emergió algo que puede describirse con justicia como una ortodoxia cuántica: una especie de partido o de escuela o de grupo, dirigido por Niels Bohr, con el apoyo muy activo de Heisenberg y Pauli; simpatizantes menos activos fueron Max Born y P. Jordan y quizá incluso Dirac. En otras palabras, los hombres más grandes de la teoría atómica pertenecían al grupo, menos dos grandes hombres que disintieron con fuerza y consistencia: Albert Einstein y Erwin Schrödinger.<sup>10</sup>

---

<sup>5</sup> Popper., *Teoría cuántica y el cisma en...* pp. 57-58.

<sup>6</sup> Popper., *El Universo abierto...* p. 27.

<sup>7</sup> Esto lo digo yo, pues al leerlo, me causa esa impresión.

<sup>8</sup> Popper., *La lógica de la investigación...* p. 201.

<sup>9</sup> Popper, *Teoría cuántica...* p. 117.

<sup>10</sup> *Ibid.*, p. 119.

Como se ve, tal parece que Popper considera que la mayoría de los físicos que se adhirieron a la interpretación (o declaración) de Copenhague conforman una camarilla de prosélitos intransigentes de Bohr, Heisenberg y Pauli. En lo personal, pienso en cómo debe proceder una comunidad de personas al encontrarse con algo novedoso que requiere ser explicado. En el caso de la génesis y cimentación de física cuántica, los científicos contaban con un vasto conjunto de experimentos que pusieron en entredicho la validez de la física clásica pues, al dar explicaciones insatisfactorias a las cada vez más numerosas evidencias empíricas, era inminente el riesgo de caer en un estado con carácter de “emergencia teórica” que dejaría inexplicado el acontecer de un importante conjunto de sucesos naturales.

El nacimiento de la teoría de la relatividad es un caso especial, por provenir del análisis reflexivo de un solo individuo; pero en lo que respecta a la mecánica cuántica, el apremio por encontrar una justificación teórica al por qué de los resultados experimentales que aparecían con una vertiginosidad pasmosa, sobre todo en el área de radiación y espectroscopia, propició que una buena parte de científicos, principalmente los jóvenes (con excepción de Planck, Boltzmann y Lorentz, científicos ya maduros que, si bien admitían las nuevas explicaciones, continuaban con un firme apego a la normatividad clásica) dedicara su atención, y de manera incesante, a tal problemática, haciéndolo a veces con mucho éxito y a veces no tanto, aun a costa del sinfín de penalidades que conlleva la carencia de conceptos.<sup>11</sup> No es posible entonces ignorar las soluciones ingeniosas dadas a los experimentos, inclusive aquellas que pasan por alto la formulación teórica existente y que introducen conceptos e ideas novedosas, muy conscientes de que el nuevo andamiaje teórico-matemático podría llevar a una posible ruptura conceptual con los cánones científicos imperantes. Kuhn lo deja en claro al decir que

[...] Una vez asimilados los descubrimientos, los científicos fueron capaces de explicar un abanico más amplio de fenómenos naturales o de explicar con mayor precisión algunos de los fenómenos ya conocidos. Ahora bien, estas ganancias se consiguieron al precio de rechazar algunas creencias o procedimientos previamente establecidos, a la vez que se sustituían esos componentes del paradigma anterior por otros distintos[...] Con todo, los descubrimientos no son las únicas fuentes de estos

---

<sup>11</sup> Aquí se aplica la sentencia que Planck profirió en su ancianidad: “Una nueva idea que rompe con las anteriores no se impone porque su evidencia sea tan alta que todos se convencen enseguida de su verdad, sino porque quienes han sido educados en los presupuestos anteriores se van muriendo poco a poco y son sustituidos por una nueva generación que no tiene ningún problema para aceptar esas nuevas ideas desde el principio” (Fernández-Rañada, A. (2004): *Ciencia, incertidumbre y conciencia. Heisenberg*; Científicos para la historia; Nivola libros y ediciones, S. L.; España p. 100). Planck coincide, obviamente sin saberlo, con lo que arguye Kuhn medio siglo después (en la Estructura de las Revoluciones Científicas), sosteniendo que los modificadores de un *paradigma* suelen ser los jóvenes.

cambios paradigmáticos destructivo-constructivo. [...] Empezaremos a considerar los desplazamientos semejantes, aunque usualmente mayores, resultantes de la invención de teorías nuevas.<sup>12</sup>

Llegado al punto en que el nuevo planteamiento teórico se separa abruptamente de la antigua ciencia, los científicos buscaron explicar la naciente teoría a través de la conceptualización clásica.

Situémonos pues, y por un instante, junto a los creadores de la física cuántica y veámoslos con la cada vez más imperiosa necesidad de organizar sus ideas; entenderíamos entonces como algo natural su proclividad a reunirse, convocando a un concilio que permitiera ver en qué estaban parados y el estado en que se encontraban las explicaciones dadas por la aún imberbe teoría; en estas reuniones analizarían y ordenarían lógicamente sus ideas y conceptos, reencauzarían objetivos y tal vez, fijarían derroteros para abordar cabalmente los diversos problemas bajo estudio. Todo ello por la preocupación de que la ciencia consuetudinaria está en presencia de nuevas evidencias que requieren explicación, y qué mejor que hacerlo entre muchos pues “dos cabezas piensan más que una”. Creo que esa es la razón por la que a tales cónclaves de experticia asistieron, sin excepción, los grandes científicos de la época. Hubo un sinnúmero de reuniones en las universidades e institutos de investigación, pero el congreso que más fama cobró, por ser fundamental para el desarrollo de la física cuántica, fue el de la declaración de Copenhague, congreso liderado por Bohr, Heisenberg, Pauli y Born, además de que muchos otros físicos la suscriben. Es en dicho evento donde se fijan los postulados que sirven de base a la naciente física cuántica,<sup>13</sup> conocida hoy día como *teoría cuántica antigua*.

En ese entonces, de las entrañas de la mecánica cuántica nacieron dos teorías exitosas: la mecánica matricial y la mecánica ondulatoria –que posteriormente se demostró que son equivalentes entre sí–, teniéndose que la mecánica matricial es a la mecánica hamiltoniana como la mecánica ondulatoria lo es a la teoría de Hamilton-Jacobi.

Y tal es verdad pues la mecánica matricial sería, dada su apariencia, el émulo cuántico de la mecánica hamiltoniana, y posee una formidable herramienta matemática que permite resolver problemas excesivamente difíciles de partículas en movimiento; en cambio, la mecánica ondulatoria es el equivalente a la teoría clásica de Hamilton-Jacobi y su onda de acción. Quizá haya sido este modo de explicar el comportamiento de las

---

<sup>12</sup> Kuhn., *La estructura de...* p. 149.

<sup>13</sup> Cfr. Capítulo 3.

partículas en movimiento lo que motivó a Schrödinger a buscar un modelo alternativo a la mecánica matricial; en todo caso, en ambas teorías, la clásica de Hamilton-Jacobi y la ondulatoria de Schrödinger, subyacen las ideas de continuidad y determinismo.

Ahora bien, una de las virtudes que más descollaban en la teoría cuántica antigua –la teoría vigente hasta el advenimiento de la ecuación de Schrödinger– era su impresionante y eficiente formalidad matemática, asentada en el álgebra matricial que, aunada a sólidos argumentos conceptuales, la dotaban de una singular fortaleza en lo referente a su capacidad predictiva, tan es así que contaba, entre sus éxitos explicativos más significativos, la obtención de las capacidades caloríficas de los sólidos a temperaturas muy bajas, fenómenos inexplicables hasta entonces. Nagel se pronuncia en sentido parecido, al opinar que

La teoría cuántica estuvo destinada a explicar una serie de leyes experimentales concernientes a los fenómenos de radiación térmica y de la espectroscopia, fenómenos que eran aparentemente inexplicables sobre la base de la teoría clásica de la radiación. Pero luego la teoría cuántica fue modificada y ampliada para que abarcara fenómenos de la óptica física, la cristalografía, la química y muchos otros dominios especiales de la investigación. En su forma más reciente, es posible desarrollar la teoría cuántica de dos maneras matemáticamente equivalentes: o bien mediante el álgebra de matrices introducida por Heisenberg, o bien mediante el formalismo asociado a la ecuación de onda de Schrödinger.<sup>14</sup>

Sin embargo, la formalidad matricial desagradaba en demasía a la mayoría de los físicos de la época, que la consideraban demasiado fría, impersonal y abstracta (de hecho, parece ser que no todos conocían con detalle el álgebra matricial; Born fue una de las grandes excepciones). A pesar de una ingente cantidad de logros explicativos, la teoría cuántica antigua afrontó muchas y acerbas críticas, de entre las que sobresalían las que exaltaban sus debilidades más notorias, a saber:

- a) Que no explicaba sistemas físicos que no fuesen periódicos.<sup>15</sup>
- b) Que no podía calcular las velocidades de ocurrencia de las transiciones, aun cuando posibilitara el cálculo de energías y frecuencias, bien fuese para los estados permitidos de algunos sistemas o para los fotones emitidos o absorbidos por el sistema al experimentar una transición.

---

<sup>14</sup> Nagel, E. (1991): *La estructura de la ciencia. Problemas de la lógica de la investigación científica*; Ediciones Paidós. España. p. 272.

<sup>15</sup> Las reglas de cuantización de Wilson-Sommerfeld solamente se aplicaban con éxito a los sistemas periódicos. (Eisberg-Resnick., *op. cit.*, pp. 146-149).

- c) Que no explicaba el comportamiento del He (pues tiene dos electrones), aunque sí lo hacía con bastante éxito al aplicarse a los átomos monoeléctricos, y
- d) Que a veces parecía falta de coherencia, tornándose insatisfactorio trabajar con ella.

Fue por eso que en 1926, al aparecer en escena Erwin Schrödinger con una nueva concepción que permitía abordar de una manera más intuitiva el comportamiento cuántico (ingresando así a la selecta grey de creadores de la nueva física) y generalizar el postulado de de Broglie en un desarrollo teórico magistral, la comunidad científica lo recibió con el mayor de los regocijos. Con la mecánica ondulatoria de Schrödinger, había nacido la mecánica cuántica moderna.

Si recordamos, la expresión de de Broglie,  $\lambda=h/p$ , permite encontrar la longitud de onda  $\lambda$  a partir de los patrones de difracción empleados en el estudio del movimiento de las partículas –mediciones en las que  $\lambda = \text{constante}$ –, y aun cuando asegura que el movimiento de una partícula tiene asociada una onda –o como se admite hoy día, está gobernada por ella– no indica cómo es que ésta (la onda) se propaga.

Es por ello que se considera que fue la ecuación de onda de Schrödinger<sup>16</sup>

$$-\frac{\hbar}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x,t)}{\partial x^2} + V(x,t)\Psi(x,t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t} \text{ ----- (1)}$$

la generatriz o impulsora de la teoría cuántica moderna; dicha forma de abordar la mecánica cuántica se ha denominado desde entonces *mecánica ondulatoria*, y vino a subsanar las deficiencias mostradas por la expresión de de Broglie. La función solución de la ecuación (1), está dada por  $\Psi(x,t)$ , que recibe el nombre de *función de onda*, y proporciona el estado cuántico de un sistema.<sup>17</sup>

Ahora bien, es inminente la pregunta de ¿quién decide, o cómo decide qué teoría se emplea o no? Pienso que, de manera natural, es el propio gremio científico el que toma la decisión, y lo hace no nada más porque hay un conjunto de científicos que supera en cantidad de personas, personalidades y organización, a otro u otros grupos; eso tal vez

<sup>16</sup> En forma general, la ecuación de Schrödinger se expresa como:  $-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r})\Psi(\vec{r}, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t}$ . Para el estado estacionario, la solución es:  $\Psi(\vec{r}, t) = \Psi(\vec{r})e^{-iEt/\hbar}$ .

<sup>17</sup> Frecuentemente se aduce que la función de onda  $\Psi(\vec{r}, t)$  sólo es un elemento operativo, o de cómputo, que soluciona la expresión (1). Sin embargo, dicha función provee toda la información (que el principio de incertidumbre permite conocer) acerca de la partícula asociada.

funcione bien en la vida política de una sociedad, pero en el ámbito científico cuentan otros factores. Indudablemente, habría la posibilidad de que una teoría se entronizase por la imposición de un grupo de notables, pero es improbable que se lleve a cabo porque las sociedades científicas no funcionan así, sino que lo hacen más bien por la aprobación de sus integrantes. Así, la teoría es admitida o rechazada por los científicos cuando evalúan, mediante los procedimientos habituales del quehacer científico –congresos, revistas especializadas, seminarios, experimentos, etc.– su contenido de verdad y su concordancia con las evidencias experimentales. La evaluación de la teoría es un proceso continuo que somete a feroz escrutinio tanto la estructura lógica de la teoría como la fortaleza de sus leyes, motivando una revisión exhaustiva de la axiomatización, coherencia interna, formalismo, sencillez y sistematización, así como la capacidad predictiva que posee y la precisión que suministra (es decir, las cifras significativas que están en concordancia con los datos experimentales), considerando además su potencial capacidad explicativa que se desprende del entramado conceptual. De hecho, fue precisamente la discordancia entre la teoría y los hechos experimentales que la física clásica dejó de ser útil para explicar eventos relativistas y cuánticos y, a su vez, fue la concordancia teoría-hechos experimentales lo que permitió la asunción de la teoría cuántica a la aceptación de la comunidad científica.

Digo esto porque disiento con el “yo acuso” que levanta Popper contra los suscriptores de la declaración de Copenhague, a los que imputa un férreo dogmatismo por seguir, según él, ciegamente a Bohr, y al negarse –aduce– sistemáticamente a revisar los fundamentos de la teoría cuántica. Pero dudo que así fuese, pues de otra manera el ‘grupo dogmático’ se hubiese cerrado en sus convicciones y no habrían podido llevarse a cabo las famosas discusiones de Einstein y Bohr, donde el último se jacta de resistir todos los embates intelectuales y conceptuales del primero. Einstein no pudo vencer a Bohr, por lo que las posibles –y aparentes– debilidades de la teoría se superan o permanecen, en el peor de los casos, en un ‘*impasse*’, aguardando nuevos tiempos y nuevas ideas; con ello, la teoría, o una parte de ella, va posicionándose en la comunidad científica, siendo admitida por sus logros y predicciones, así sea con el mayor desconsuelo de sus detractores.

A la ecuación de Schrödinger, que pese a su sencillez conceptual y debido a que no puede obtenerse enteramente de las evidencias experimentales, la comunidad científica

le obligó a cumplir, como condición de mostrar su verdadera fortaleza teórica y valía ideográfica, a satisfacer las siguientes condiciones:

a) Que la ecuación debe ser consistente con los postulados de Einstein y de de Broglie:

$$E = h\nu \quad \text{y} \quad \lambda = \frac{h}{p} \text{ ----- (2)}$$

b) Igualmente, (la ecuación) debe coincidir con la expresión de la energía total de una partícula de masa  $m$  en términos de su energía cinética ( $p^2/2m$ ) y su energía potencial ( $V$ ), es decir:

$$E = \frac{p^2}{2m} + V \text{ ----- (3)}$$

c) Que tiene que ser lineal en  $\Psi(x, t)$ .<sup>18,19</sup>

d) Y postular que la energía potencial de una partícula libre está dada por

$$V(x, t) = V_0 \text{ ----- (4)}$$

asegurando con ello que la fuerza neta sobre ella es no nula (puesto que  $\vec{F}_x = -\vec{\nabla}_x V(x, t)$ , y  $\vec{F}_x = 0$  sólo cuando  $V_0 = \text{constante}$ ), por lo que así la PDE (1) tiene como soluciones ondas sinusoidales viajeras de longitud de onda y frecuencia constantes, similares a las obtenidas para otros potenciales.<sup>20</sup>

Los cuatro puntos anteriores se conocen con el nombre de *Argumentos de Plausibilidad*, y por convención formal se obliga a que la ecuación de onda de Schrödinger –expresión (1)– los satisfaga cabalmente, pues

<sup>18</sup> Esto significa que al tener dos soluciones diferentes,  $\Psi_1(x, t)$  y  $\Psi_2(x, t)$ , que satisfacen la PDE (Ecuación Diferencial Parcial) dada por (1) para una  $V$  cualesquiera, entonces, cualquier combinación lineal arbitraria  $\Psi(x, t) = c_1 \Psi_1(x, t) + c_2 \Psi_2(x, t)$ , con  $c_1$  y  $c_2$  constantes, también es solución de la expresión (1).

<sup>19</sup> Se exige la linealidad de las soluciones ya que las funciones se deben sumar para producir la interferencia (constructiva o destructiva) de las ondas.

<sup>20</sup> Las expresiones obtenidas son de la forma habitual para una onda viajera:  $\Psi(x, t) = \Psi_0 \sin 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} \mp \nu t \right)$ , donde  $\nu$  es la frecuencia y  $\lambda$  es la longitud de onda.

en el análisis final, la ecuación de onda mecánico cuántica deberá obtenerse de un postulado, cuya justificación no es el que haya sido deducida por completo a partir de la información experimental ya conocida, sino que predice correctamente los resultados que se pueden verificar experimentalmente.<sup>21</sup>

El éxito de la mecánica ondulatoria comenzó de inmediato, puesto que asimilaba el acontecer cuántico a la física clásica, en particular, reivindicando la Segunda Ley de Newton, al ser (la ecuación de Schrödinger) el análogo de dicha ley clásica del movimiento, y permitir ambas expresiones el determinar claramente cómo evoluciona un sistema en un referencial dado. Así, la física nuevamente estuvo de plácemes.

Heisenberg, mientras tanto, se dedicó a estudiar las similitudes y diferencias entre su modelo y el propuesto por Schrödinger, convencido plenamente de que la mecánica matricial era la verdadera panacea cuántica, pues contiene toda la información necesaria para describir el acontecer del mundo atómico. Heisenberg consideraba que la mecánica ondulatoria no era más que un método matemático que permitía visualizar algunos fenómenos con cierta facilidad y claridad “clásica”, dada su similitud conceptual con la física newtoniana, pero no tenía la menor duda de que la mecánica matricial estaba destinada a ser, más que la panacea computacional del micromundo, la verdadera mecánica cuántica. Pero cosas del destino, pues cuando más ensimismado estaba Heisenberg en su tarea, Schrödinger volvió a la carga, sorprendiendo a propios y extraños al mostrar que la mecánica matricial y la mecánica ondulatoria eran matemáticamente equivalentes,<sup>22</sup> y que únicamente eran maneras distintas de abordar el mundo cuántico.<sup>23</sup> Con este paso, se estaba en los umbrales de una paradójica e inminente conjunción: la dualidad onda-partícula de la materia.

## 4.2 Born y la introducción de la probabilidad

La excitación que invadía a los físicos cuánticos de la década de los 20's era palpable, pues nuevamente, y como tantas otras veces ha ocurrido en la historia de la ciencia, se encontraban al alcance de la mano dos alternativas teóricas que explicaban el mismo

---

<sup>21</sup> Eisberg-Resnick., *Física cuántica. Átomos...* p. 163.

<sup>22</sup> Esta equivalencia entre ambos modelos fue mostrada aun con más rigor por Dirac y Jordan.

<sup>23</sup> De hecho, ambas perspectivas matemáticas son igual y potencialmente aplicadas a la hora de orientarse a resolver un problema, dependiendo únicamente de la tipología de éste: mientras que la mecánica ondulatoria exhibe su fortaleza y simplicidad a la hora de determinar los niveles de energía de átomos y moléculas, la mecánica matricial despliega su efectividad en el estudio de colisiones entre partículas, cálculos de perturbaciones y probabilidades de transición.

evento. Pero contar con dos opciones teóricas desencadenó una especie de furor en la comunidad científica que inmediatamente se dispuso a verificar cuál de ambas posturas concordaba mejor con los resultados experimentales. Puede pensarse también, quizá sin estar muy alejado de lo que aconteció, que la mecánica ondulatoria fue la chispa que detonó un renovado frenesí experimental en los centros de investigación del orbe que, aunado a una continua depuración y sofisticación de las técnicas experimentales, permitió incrementar el enorme conjunto de datos que aguardaban por una explicación satisfactoria. Así, ambos modelos teóricos se aprestaron a resolver los retos experimentales que se les planteaban.

Conforme se avanzaba en la resolución de los problemas que incesantemente aparecían, se encontró que a pesar de su sobria elegancia, sencillez conceptual y explicación “clásica” –al restituir la tradicional continuidad de los eventos naturales–, la ecuación de Schrödinger se mostraba inoperante e impotente para explicar satisfactoriamente una buena cantidad de experimentos, sobre todo los relacionados con el magnetismo (por ser, de hecho, un efecto relativista) y la radiación (que evidenciaban una naturaleza discreta, inherente a los objetos atómicos; no obtenía, por ejemplo, la fórmula de Planck ni explicaba el efecto Compton). La mecánica matricial, en cambio, hizo patente su primorosa fortaleza instrumental al solucionar, de manera relativamente fácil y contundente, aquellos problemas donde la teoría antagonista fallaba; de hecho, la teoría matricial mantenía una especie de doble relación (si se puede llamar así) al buscar conciliar los conceptos cuánticos con los conceptos clásicos, pretendiendo con ello mantener la rica –y fundamental– diversidad de conceptos. Asimismo, la teoría exhibía una gran afinidad “predictivo–experimental” (quizá el caso más palpable de tales éxitos haya sido la certera predicción acerca de las probabilidades de transición, que no es más que la probabilidad de pasar de un estado a otro).

Pero a pesar de los éxitos acumulados por la teoría matricial, el *desiderátum* de los científicos por alcanzar una explicación satisfactoria del mundo cuántico pervivía inmutable, lo que les hacía mostrar indecisión respecto a la entronización de alguna de las teorías pues si bien era cierto que una (teoría) era certera, la otra era fácilmente manipulable, aún cuando en lo esencial subsistían profundas dudas acerca de su significancia física, principalmente en lo relativo a la función de onda  $\Psi$ . Schrödinger había exaltado como atributos esenciales de su modelo ondulatorio: (a) eliminar la rigidez matemática en la explicación de los eventos; (b) reintroducir la terminología propia de la

física clásica, eliminando las palabras poco comprensibles como ‘salto cuántico’,<sup>24</sup> ‘probabilidad de transición’, etc. (c) posibilitar la comprensión física del fenómeno bajo estudio (es más fácilmente viable intuir físicamente el concepto de onda viajera que el de ‘salto cuántico’); (d) que la función de onda  $\Psi$  era la representación de una onda de materia propagándose a través del espacio, con la cantidad  $\Psi^*\Psi (= |\Psi|^2)$  gozando de las propiedades de una función de densidad,<sup>25</sup> análogas a las de la física clásica, y (e) que la función de onda obedecía una ecuación de continuidad.

Para la función de densidad, Schrödinger proponía que  $\Psi^*\Psi$ , al multiplicarse por  $e$  (la carga elemental), proporcionaba la densidad de carga de la partícula y que ésta se distribuía de manera continua en el espacio, buscando con ello salvar el obstáculo experimental de una energía discreta, permitiéndole además retomar el determinismo de la física clásica. Pero tal idea no prosperó pues los experimentos mostraban que la onda no se propaga a través del espacio tridimensional, sino que lo hace en el espacio de configuraciones de cada partícula.<sup>26</sup> El obstáculo pues, seguía pareciendo insalvable.

---

<sup>24</sup> Parece que incluso Heisenberg se encontraba incómodo con los saltos cuánticos (que no es más que el paso abrupto de la criatura atómica, al realizar una medición, de una onda a una partícula –y viceversa–, con su consecuente discontinuidad de estado) pues “en cierta ocasión comentó en una conversación con Niels Bohr: “Si todos estos condenados saltos cuánticos fueran a quedarse realmente, entonces lamentaría haber tenido algo que ver con la mecánica cuántica””. (Penrose., *El camino a la realidad...* p. 697).

<sup>25</sup> Esto era equivalente a las funciones de densidad que aparecen en el electromagnetismo, donde la densidad, y por supuesto, la intensidad de una onda está relacionado directamente con la magnitud de uno de los campos; así, la densidad de energía eléctrica está dada por:  $u_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 \|\vec{E}\|^2$ , mientras que la densidad de energía magnética es:  $u_B = \frac{1}{2\mu_0} \|\vec{B}\|^2$ , ambas para el espacio libre.

<sup>26</sup> En la mecánica clásica, la configuración de un sistema de  $N$  partículas puede especificarse por las  $3N$  coordenadas cartesianas:  $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots, x_N, y_N, z_N$  de sus partículas, o bien, por cualquier conjunto de  $3N$  coordenadas generalizadas:  $q_1, q_2, \dots, q_{3N}$ . Ahora bien, dado que en cada configuración del sistema las coordenadas generalizadas han de tener un cierto conjunto definido de valores, las coordenadas  $q_1, q_2, \dots, q_{3N}$  serán funciones de las coordenadas cartesianas y del tiempo (en el caso de sistemas móviles), es decir:

$$\begin{aligned} q_1 &= q_1(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots, x_N, y_N, z_N; t) \\ q_2 &= q_2(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots, x_N, y_N, z_N; t) \\ &\vdots \\ q_N &= q_N(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots, x_N, y_N, z_N; t). \end{aligned}$$

Las coordenadas  $q_1, q_2, \dots, q_f$  son entonces las coordenadas de un punto en un espacio de  $f$  dimensiones, al que se denomina *el espacio de configuración* del sistema mecánico. Más aun: a cada punto en el espacio de configuración corresponde una configuración de las partes del sistema, y cuando el sistema se mueve, el punto  $q_1, q_2, \dots, q_f$  describe una trayectoria en el espacio de configuración. Tal trayectoria no es más que *la historia* del sistema. Pero si deseamos especificar a la par la configuración y el movimiento del sistema en un instante dado, debemos dar sus coordenadas y velocidades, es decir, sus posiciones  $q_1, q_2, \dots, q_f$  y sus

Inesperadamente, Max Born –otro físico brillante y talentoso que suscribió la declaración de Copenhague, quien al conocer la expresión (1) profirió que “la mecánica ondulatoria es la forma más profunda de las leyes cuánticas”<sup>27</sup> introdujo la llamada *interpretación estadística* de  $\Psi^*\Psi$ , proponiendo que tal producto no es más que una medida de la densidad de probabilidad de encontrar al electrón en una posición determinada, con lo que le dio un nuevo sentido y un renovado brío a la ecuación de Schrödinger pues, al proponer la interpretación estadística, Born estableció una conexión fundamental entre las propiedades de la función de onda  $\Psi(x,t)$  y el comportamiento de su respectiva partícula asociada; de hecho, lo enuncia con toda propiedad al decir:

De acuerdo con este punto de vista, el curso completo de eventos está gobernado por las leyes de la probabilidad, a un estado en el espacio, le corresponde una probabilidad definitiva, la cual es dada por la onda de de Broglie asociada con el estado. Por lo tanto, un proceso mecánico es acompañado por un proceso ondulatorio, la onda-guía, descrita por la ecuación de Schrödinger, cuya importancia está en dar la probabilidad de un curso definitivo del proceso mecánico. Si por ejemplo, la amplitud de la

---

momentos  $p_1, p_2, \dots, p_f$ . El espacio resultante de  $2f$  dimensiones, cuyos puntos están determinados por las coordenadas y momentos se denomina *espacio de las fases* del sistema mecánico. Al moverse el sistema, el punto en el espacio de las fases:  $q_1, q_2, \dots, q_f; p_1, p_2, \dots, p_f$  describe una trayectoria en ese espacio; la velocidad del punto está dada por las ecuaciones de Hamilton:  $\dot{q}_k = \frac{\partial H}{\partial p_k}, \dot{p}_k = -\frac{\partial H}{\partial q_k}, k = 1, 2, \dots, f$  donde

$H = \sum_{k=1}^f p_k \dot{q}_k - L$ ; y H es el operador hamiltoniano, L es la función lagrangiana del sistema:  $L(q_1, q_2, \dots, q_f; p_1, p_2, \dots, p_f; t) = T - V$ , con  $T =$  energía cinética y  $V =$  energía potencial. Si el sistema es holónomo y consta de N partículas sujetas a  $c$  ligaduras independientes, y si  $f$  es el número de grados de libertad, entonces  $f = 3N - c$ ; donde por sistema holónomo significamos que sus condiciones de ligadura pueden ser expresadas mediante ecuaciones matemáticas entre sus coordenadas o ecuaciones diferenciales integrables).

La mecánica cuántica se ocupa también del estudio de la evolución de un sistema físico –tal y como lo hace la mecánica clásica– sólo que a nivel subatómico; pero para estudiar el comportamiento evolutivo, es menester determinar un marco conceptual diferente que permita formular más fácilmente cómo evoluciona el sistema, lo que conduce a manejar el espacio de configuración; es decir, seleccionamos un conjunto de coordenadas  $Q_f = (q_1, q_2, \dots, q_f)$  independientes, asociadas a cada función compleja:  $\psi(q_1, \dots, q_f)$  de tal manera que  $\int_{Q_f} \Psi^* \Psi dq_f = 1$  es un estado del sistema; tal estado no está representado entonces por la  $2f$ -ada:

$q_1, \dots, q_f; q'_1, \dots, q'_f$ , ni por la  $2f$ -ada:  $q_1, \dots, q_f; p_1, \dots, p_f$  del espacio de fases, sino por una función que toma valores complejos para cada  $f$ -ada de valores de las coordenadas. La cantidad

$P = \Psi^*(q_{1i}, \dots, q_{fi}) \Psi(q_{1i}, \dots, q_{fi}), i = 0, 1, 2, \dots, f$ , (estados de referencia), resulta ser la probabilidad de que en una medida de las coordenadas del sistema, éstas valgan  $q_{1i}, \dots, q_{fi}$ . Más aún, si  $k$  es un conjunto de posibles medidas del sistema,  $P(k \subset Q_f) = \int_k \Psi^* \Psi dq_f$  representa la probabilidad de que en una medida, el

valor de las coordenadas del sistema esté en  $k$ . Es obvio entonces que la diferencia entre la física clásica y la mecánica cuántica radica en la determinación del estado del sistema: en aquélla, es suficiente con especificar el valor de la  $2f$ -ada de coordenadas del espacio de fases; en esta última, es imprescindible la función compleja definida sobre el espacio de configuración, lo que lleva a una interpretación final del estado de tipo probabilista, en contraposición con la interpretación determinista de la mecánica clásica.

<sup>27</sup> Fernández-Rañada., *op. cit.*, p. 87.

onda-guía es cero en cierto punto del espacio, esto quiere decir que la probabilidad de encontrar el electrón en ese punto es despreciablemente pequeña.<sup>28</sup>

Born postula entonces la función de densidad de probabilidad como

$$P(x, t) = \Psi^*(x, t)\Psi(x, t) \text{ ----- (5)}$$

solucionando con ello los problemas conceptuales asociados a la ecuación de Schrödinger y clarificando, de manera por demás convincente, cómo se lleva a cabo la propagación de la onda en el espacio de configuraciones a la vez que salva el caso de la discretización de la energía. Pero con ello, hace de lado el determinismo clásico e introduce la idea de una naturaleza discreta.

Y pretendiendo solucionar un problema, Born proveyó, sin quererlo, una de las piedras angulares del *corpus* teórico de la mecánica cuántica moderna: la expresión (5) que, con una irrupción súbita y exitosa en la escena cuántica, proporcionó a partir de entonces la probabilidad de encontrar a la partícula en las vecindades de  $x$  en un tiempo dado. El postulado de Born actualmente se enuncia como “si en el instante  $t$  se realiza una medición para localizar a la partícula asociada con la función de onda  $\Psi(x, t)$ , entonces la probabilidad  $P(x, t) dx$  de encontrar a la partícula en una coordenada entre  $x$  y  $x+dx$  es igual a  $\Psi^*(x, t)\Psi(x, t) dx$ ”.<sup>29,30</sup>

El producto  $\Psi^*\Psi$  entraña un hecho de gran trascendencia no nada más de carácter físico, sino también de índole epistemológica,<sup>31</sup> debido a que esta expresión aclara el por qué es factible conciliar las imágenes ondulatorias y corpusculares en una sola entidad física. De hecho, tanto Schrödinger como Born se percataron de la magnitud de sus

<sup>28</sup> Eisberg-Resnick., *Física cuántica. Átomos...* p. 90.

<sup>29</sup>  $\Psi^*(x, t)$  representa el complejo conjugado de  $\Psi(x, t)$ .

<sup>30</sup> Eisberg-Resnick., *Física cuántica. Átomos...* p. 170.

<sup>31</sup> Es análogo a las ondas de radiación einstenianas. Einstein introdujo la idea granular en la radiación, en lugar de la interpretación continua maxweliana. Al resolver la ecuación de onda unidimensional:  $\nabla_x^2 \Psi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}$ , en vez de dar la solución como:  $\Psi(x, t) = A \sin(kx \mp \omega t) = A e^{-i(\omega t \pm kx)}$  (donde  $k = 2\pi/\lambda$  (número de onda),  $\omega = 2\pi\nu$  (frecuencia angular),  $A =$  amplitud de la onda), encontró que la intensidad de la onda (en valor medio), en vez de estar dada como  $\|\vec{S}\| = \frac{1}{2\mu_0 c} \|\vec{E}\|^2$  (con  $\vec{S}$  = vector de Poynting) puede reescribirse como  $I = \frac{1}{\mu_0 c} \bar{E}^2 = N h \nu$ , donde  $N =$  número promedio de fotones por unidad de área por unidad de tiempo, que no es más que una medida de la probabilidad de encontrar un fotón atravesando una unidad de área en una unidad de tiempo. Por tanto, es inmediato ver que  $N$  es directamente proporcional a  $E^2$ .

alcances, aunque hayan existido diferencias conceptuales profundas en su respectiva interpretación. Con su interpretación estadística, Born sostiene que  $\Psi^*\Psi$  alude a una onda de *distribución de probabilidad de presencia*, y no a una onda entendida clásicamente. Esto modifica la visión determinista asociada al comportamiento ondulatorio tradicional, pues implica que la partícula asociada (a la onda) puede potencialmente encontrarse doquiera se propague la onda, haciéndose presente sólo de manera probable, en un punto. Esto afirma categóricamente que la probabilidad es un elemento indispensable en la descripción cuántica, además de hacer hincapié en la discontinuidad de las partículas, ubicadas en un punto del espacio determinado de manera estadística.<sup>32</sup>

Pero lo anteriormente expuesto debe movernos a reflexionar acerca de si efectivamente la naturaleza se comporta como lo enuncia el modelo, puesto que trae aparejados graves problemas de comprensión. No pongo en tela de juicio el éxito del modelo, sólo trato de comprender lo que nos dice. Y es que, a pesar de su éxito explicativo, la concepción borniana –que se ha quedado como un pilar inamovible de la mecánica cuántica– no ha dejado de ser cuestionada, debido a que, al enfrentarla por vez primera, parece una idea abstrusa.

Sin embargo, pudiera ser que la idea no es tan complicada si la abordamos, ideográficamente, así: supongamos que deseamos ‘observar’ un objeto atómico al que dotamos de extensión (para no referirnos a una partícula<sup>33</sup>) y que se halla en movimiento. De acuerdo con las tesis de de Broglie y de Schrödinger, el objeto tiene asociada una onda, aunque no se nos diga dónde se encuentra el objeto (algo así como que no sabemos si se halla al inicio, al final o en una parte intermedia de la onda.<sup>34</sup> De manera intuitiva, suponemos que la partícula se hallará donde la amplitud (de la onda) sea mayor, puesto que la probabilidad en tal sitio también será mayor. Pero ¿es esto cierto? Si es así, no habría gran problema, porque estaríamos hablando de una especie de pulsación que se propaga, y el pulso nos indica dónde se halla el objeto. La cuestión esencial es ¿qué ocurre si la onda no se comporta como una pulsación? Si la onda es, digámosle así,

---

<sup>32</sup> Esta idea se maneja cotidianamente en química inorgánica, no siendo más que la REEMPE, acrónimo de: Región Espacio Energética de Manifestación Probabilística Electrónica.

<sup>33</sup> Clásicamente, definimos una partícula como un objeto puntual sin dimensiones espaciales; es decir, es un punto en el espacio.

<sup>34</sup> Aquí apelo al concepto habitual que tenemos de una onda: perturbación de un campo que transporta energía; en el caso de las ondas mecánicas: es una perturbación del medio, y el transporte de energía se lleva a cabo por las propiedades de inercia y elasticidad del medio, y por las variaciones de energía cinética y energía potencial de las partículas que transmiten la perturbación. En el caso electromagnético, la propagación de la onda se debe a las oscilaciones armónicas de los campos.

‘uniforme’ (es decir, con una longitud de onda constante, una frecuencia constante, y una amplitud constante) ¿Cómo sabemos dónde se halla el objeto, ya que la amplitud no se incrementa, y por tanto no disminuye, en sitio alguno? En tal caso, ¿La probabilidad sería cero? La respuesta sería claramente: no. Efectivamente, mientras la onda no encuentre alguna partícula con la que pueda interactuar, sus características físicas permanecen invariables, y el hallar al objeto asociado en cualquier sitio es equiprobable; de ahí el argumento estadístico-probabilista de Born respecto de que la partícula asociada a la onda puede localizarse en cualquier sitio donde ésta se esté propagando, potencializando así su localización en todo el espacio.<sup>35</sup>

Pero en caso de que la onda interactúe con otra partícula –inclusive podemos suponer que también está en movimiento, y con su respectiva onda asociada–, ‘veríamos’ cómo cambia la amplitud de la onda que estamos ‘observando’, y esto debido a que en realidad estamos ‘observando’ la superposición de las ondas que producen interferencia constructiva en un sitio determinado –suponemos que donde se da la interacción de las partículas–, lo que da lugar a una onda resultante cuya amplitud es mayor que la de las ondas individuales. Tal es la pulsación que ‘percibimos’, y nuevamente, la probabilidad de hallar la partícula en ese sitio aumenta sensiblemente.<sup>36</sup> Esto sería lo que interpretamos como la interacción de las partículas. Popper lo expresa con toda claridad, al exponer que

La interpretación estadística dada por Born de ambas teorías resolvió la paradoja de que fuesen equivalentes dos imágenes tan radicalmente diferentes como las de partícula y onda: puso de manifiesto que también la teoría ondulatoria puede tomarse como teoría corpuscular, ya que cabe interpretar la ecuación de onda de Schrödinger de modo que nos dé la probabilidad de encontrar el corpúsculo en una región cualquiera dada del espacio (la probabilidad está determinada por el cuadrado de la amplitud de onda: es grande en el interior del paquete de ondas, en que éstas se refuerzan mutuamente, y tiende a cero fuera de él).<sup>37</sup>

---

<sup>35</sup> Esto estaría dado por el valor esperado (o promedio) de la posición de la partícula; en notación cuántica, el promedio (representado entre ‘brackets’) estaría dado por:  $\langle f(x) \rangle = \frac{\int \Psi^*(x,t) f(x) \Psi(x,t) dx}{\int \Psi^*(x,t) \Psi(x,t) dx}$ , donde  $f(x)$  es

una función de la posición de la partícula.

<sup>36</sup> Esto nos conduce a manejar la *delta de Dirac*:

$$\delta(x - x') = \begin{cases} \infty, & \text{si } x = x' \\ 0, & \text{si } x \neq x' \end{cases}, \text{ y}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x - x') dx' = 1$$

que, por el Teorema Convolución nos conduce a la integral del producto  $\Psi^* \Psi$ .

<sup>37</sup> Popper., *La Lógica de la investigación...* p. 207.

De lo anterior, queda de manifiesto claramente que en la naturaleza dual subyace la imprecisión al desear determinar con toda 'exactitud' si nos referimos a una onda o a un corpúsculo al procurar describir a los objetos atómicos; es decir, el Principio de Incertidumbre de Heisenberg corre por las venas de la teoría ondulatoria.

Se puede colegir entonces cómo de la ecuación de Schrödinger se deriva que los objetos atómicos asuman un comportamiento dual onda-partícula;<sup>38</sup> quizá haya sido esto lo que motivó que a las funciones de estado (o funciones de onda) –con su información esencialmente estadística–, al principio de complementariedad de Bohr (que vincula ondas con partículas), y al Principio de Incertidumbre de Heisenberg se les haya elevado al rango de postulados fundamentales de la mecánica cuántica en la multi-referida declaración de Copenhague.

En suma, el genio de Born solucionó en buena medida la problemática que aquejaba a la ecuación de onda de Schrödinger, pero fue la sencillez matemática de la ecuación, aunada a su sencillez intuitiva, lo que inclinaron la opinión de la comunidad científica a favor de la mecánica ondulatoria, aun cuando algunas de sus limitantes son insoslayables (por ejemplo, la ecuación sólo se aplica satisfactoriamente al átomo de hidrógeno; para átomos de más electrones se complica su descripción y se pierde precisión). No obstante, con el transcurso del tiempo, tanto la mecánica matricial como la mecánica ondulatoria han sido admitidas e igualmente empleadas, dependiendo su aplicación del tipo de experimento que se desee realizar.

### 4.3 Los objetos atómicos y la dualidad

Popper refiere que: “la gran tarea de las ciencias naturales y de la filosofía natural es ofrecer una imagen coherente e inteligible del universo”. Prosigue en el mismo talante en el párrafo siguiente:

En este intento de entender el mundo, la ciencia física, con su maravillosa combinación de creatividad especulativa y de apertura a la experiencia, ha adquirido una importancia fundamental. Esto no fue siempre así, y puede no seguir siéndolo en el futuro.<sup>39</sup>

---

<sup>38</sup> Es complicado hablar de una partícula cuántica en el sentido clásico; de hecho, Penrose señala que “la partícula cuántica (no relativista) es algo descrito por lo que hemos denominado un *vector de estado* (o función de onda) cuya evolución viene dada, de una forma muy exacta, por la ecuación de Schrödinger, hasta que se realiza una medida sobre el sistema” (Penrose., *El camino a la realidad...* p. 712).

<sup>39</sup> Popper., *Teoría cuántica y el cisma en...* p. 25.

Lo que Popper manifiesta respecto de la física y su intención de comprender lo que ocurre en la naturaleza es una verdad sin dobleces, aunque también es cierto que en busca de esa comprensión a veces suele darse la duplicidad de teorías; históricamente tenemos varios ejemplos, pero el caso que nos ocupa lo conforman los desarrollos de la teoría matricial y la teoría ondulatoria; es decir, dentro de un mismo campo de conocimientos puede haber más de una propuesta coherente e inteligible que dé fe del acontecer, bien sea descriptiva o explicativamente, de un conjunto de eventos naturales (v. g.: la teoría geocéntrica de Ptolomeo era bastante coherente, al igual que la teoría heliocéntrica copernicana, o las teorías ondulatoria de Huygens y la corpuscular de Newton, etc.).<sup>40</sup> En el caso cuántico, esta no-unicidad de teorías nos conduce, irremisiblemente, a reflexionar acerca del problema relacionado con el conocimiento de la verdadera naturaleza de los objetos atómicos, y cuestionar si tales objetos tienen existencia real o no son más que una mera invención teórica de la física cuántica. Para quien esto escribe no hay duda: la existencia de tales entidades es inobjetable pues tenemos evidencias de algunas de sus muchas y variadas consecuencias, bien sea en el ámbito tecnológico o en el científico; ha sido gracias a su descubrimiento y manipulación controlada que hemos desarrollado la electrónica, las comunicaciones y la generación de energía nuclear, por citar algunos ejemplos.

Más aún: al ingresar a un laboratorio de física y observar (y cuantificar) los fenómenos de difracción de electrones o del efecto fotoeléctrico, no nos queda más alternativa que admitir que existe ‘algo’ –que denominamos objetos atómicos– que ocasiona tales efectos, es decir, ese algo posee una existencia tangible, similar a los objetos del mundo material;<sup>41</sup> sin embargo, cuando buscamos conocer las características de tales objetos, nos encontramos que éstos poseen atributos especiales que les permiten ‘adecuarse’ a la situación experimental, como si predijeran lo que van a afrontar y decidieran,

---

<sup>40</sup> La teoría ptolemaica a veces se considera descriptiva por circunscribirse a ser una teoría predictiva, sin decir el por qué de la estabilidad y configuración del sistema ni dar cuenta del por qué de los movimientos. La teoría heliocéntrica es más simple y clara en su apreciación del movimiento de los astros, y sienta las bases para introducir posteriormente el concepto de fuerza, ese concepto inobservable –aunque tangible– que mantiene la cohesión del sistema solar y que sienta las ‘bases explicativas’ de la relación directa entre los eventos. En ambos casos, creo, se pretende dar una descripción en términos de los sucesos que se tiene a mano, sin abordar la esencia de las cosas, sólo que una teoría lo hace más simple y clara (lo ‘explica mejor’) que la otra. En tal sentido admitimos que una es explicativa y otra no.

<sup>41</sup> Aunque esto no signifique precisamente que esté constituido por materia, a menos que se considere la equivalencia relativista entre masa y energía dada por la relación:  $E = mc^2$ ; igualmente podríamos estar hablando de campos o interacciones entre objetos –que tal como he mencionado, las detectamos por las fuerzas– que se relacionan con los objetos materiales. Es en este sentido que significo la existencia material.

instantáneamente y bajo un ‘mecanismo extraño’, qué concepto o imagen física (partícula u onda) deben adoptar;<sup>42</sup> son tales atributos los que no podemos elucidar con precisión en este momento, aun cuando puedan ser explicados (quizá deba decir, modelados) matemáticamente de tal suerte que las predicciones de los modelos concuerdan con lo que se observa en un laboratorio.

Y es que la naturaleza dual de los objetos atómicos es un problema epistémico profundo que permanece sin solución satisfactoria hasta este momento si rechazamos el postulado de que los objetos atómicos son entidades duales –tal y como admitimos la naturaleza dual de la luz–,<sup>43</sup> es decir, si mantenemos intacta nuestra visión clásica de las entidades físicas separadas, el problema cuántico es irresoluble pues no existe propuesta admisible que sea consistente en su argumentación del por qué de la coexistencia simultánea onda-partícula en los objetos atómicos. Ahora bien, no es que no se hayan hecho intentos por resolver tal problema, sino que, insisto en ello, no se ha encontrado una justificación convincente al por qué de tal comportamiento; esto se debe, primeramente, a que no se ha podido ingresar físicamente al mundo cuántico y así conocer la ‘verdadera’ constitución de, digamos, un átomo o un fotón –resultando infructuosos, hasta hoy, todos los esfuerzos–, por lo que tenemos que contentarnos sólo con deducciones lógicas que se apegan a los resultados experimentales; y segundo, porque lo que hizo la teoría cuántica fue adecuarse a las evidencias experimentales, sin que haya habido una deducción previa o posterior que evidencie teóricamente el por qué de la dualidad. Esto sólo nos deja como opciones viables e inmediatas especular acerca de cómo es el multicitado objeto, o en su defecto, dar certidumbre a esa existencia *sui generis*, postulando la dualidad y admitiendo que esta naturaleza (dual) es una propiedad inherente a la materia atómica, igual que clásicamente lo hacemos con la masa y la carga eléctrica de los cuerpos. Y efectivamente, este último es el caso, aunque se desee objetar que con ello tácitamente aceptamos que la naturaleza es, en sí misma, incierta en las profundidades cuánticas; vale la pena recalcar que, sin embargo, esta incertidumbre está tomada respecto a nuestras experiencias del mundo cotidiano, pues en el mundo cuántico, la dualidad se ha axiomatizado y alcanzado grado de certeza.

Ahora bien, esta postulación de una entidad dual nos puede inducir a poner en tela de juicio la efectividad y amplitud de la teoría, y colateralmente, a modificar la visión que

---

<sup>42</sup> Cfr. §2.3.

<sup>43</sup> Cfr. Capítulo 3.

tenemos de la realidad. Sin embargo, esto último resulta bastante difícil de hacer porque admitimos que la realidad es independiente de nosotros, y que existiría aun si no la observásemos.<sup>44</sup> Por tal motivo, pensaríamos que hay que modificar la teoría en aras de encontrar una explicación al porqué de la paradoja dual, algo similar a lo que se da en la física clásica que, convencionalmente, admitimos como determinista. Si nos remontamos al pasado, recordaremos que la naturaleza de la luz fue la manzana de la discordia entre Newton y Huygens, proponiendo el primero el modelo corpuscular en tanto que el segundo enfatizó la naturaleza ondulatoria. Es así que

Newton [...] permaneció ambivalente por un gran tiempo acerca de la naturaleza real de la luz. ¿Era corpuscular un flujo de partículas, como algunos sostenían? ¿O era la luz una onda en un medio que todo lo penetraba, el éter? [...] Newton concluyó que la luz blanca estaba compuesta de una mezcla de un rango completo de colores independientes. Sostuvo que los corpúsculos de la luz asociados con los varios colores excitaban el éter en vibraciones características. Además, la sensación de rojo correspondía a la vibración más larga del éter y el violeta a la más corta. Aunque su trabajo muestra una curiosa propensión para abarcar simultáneamente ambas teorías, la ondulatoria y la de la emisión (corpuscular), Newton se inclinó cada vez más hacia la última a medida que envejecía. Quizá su principal razón para rechazar la teoría ondulatoria, tal como se presentaba entonces era el ruidoso problema en la explicación de la propagación rectilínea en términos de ondas que se dispersaban en todas direcciones. [...] Casi al mismo tiempo que Newton daba énfasis a la teoría de la emisión en Inglaterra, Christian Huygens (1629-1695), en el continente, estaba difundiendo ampliamente la teoría ondulatoria.<sup>45</sup>

Con el avance del tiempo los experimentos parecieron dar la razón a Huygens, hasta que apareció el experimento del efecto fotoeléctrico, que vino a confirmar la tesis corpuscular de Newton. Se admite a partir de entonces que la luz tiene una naturaleza

---

<sup>44</sup> Con respecto a esto, Penrose acertadamente inquiere: “preguntémosnos qué está tratando esto de decirnos acerca de la «realidad». ¿Son las variables dinámicas «objetos reales»? ¿Son «reales» los estados? ¿O deberíamos decir que hemos alcanzado la realidad solo cuando hayamos llegado a magnitudes aparentemente «clásicas» que surgen como autovalores de las variables dinámicas (o de otros operadores)? De hecho, los físicos cuánticos no suelen ser muy claros sobre esta cuestión. La mayoría de ellos se sienten característicamente incómodos al abordar la cuestión de la «realidad». Pueden decir que adoptan lo que llaman una postura «positivista» y rechazan abordar la cuestión de lo que se supone que quiere decir «realidad», considerando que una pregunta semejante es «acientífica». Todo lo que deberíamos pedir a nuestro formalismo, podrían decir, es que dé respuestas a preguntas apropiadas que podamos plantear a un sistema y que dichas respuestas estén de acuerdo con los hechos observados. Si hay que creer que alguna cosa en el formalismo cuántico es «real», para un sistema cuántico, entonces creo que tiene que ser la función de onda (o vector de estado) que describe la realidad cuántica. [...] Mi propio punto de vista es que la cuestión de la «realidad» debe ser abordada en mecánica cuántica —especialmente si se adopta el punto de vista (como muchos físicos parecen hacer) de que el formalismo cuántico debe aplicarse universalmente a la totalidad de la física—, pues si no hay realidad cuántica, no puede haber realidad en absoluto a ningún nivel (ya que según esta idea todos los niveles son niveles cuánticos). Necesitamos una noción de realidad física, incluso aunque solo sea provisional o aproximada, pues sin ella nuestro universo objetivo, y con ello la totalidad de la ciencia, ¡se evapora ante nuestra mirada contemplativa! (Penrose., *El camino a la realidad...* pp. 685-686).

<sup>45</sup> Hecht, E. & Zajac, A. (1974): *Óptica*; Fondo Educativo Interamericano, S. A.; USA. 1977. pp. 3-4.

dual, evitando con ello un conflicto teórico por tal ambigüedad (la onda se distribuye en el espacio y la partícula se localiza en un punto). Pero esta dualidad conceptual de la luz que surgió de evidencias experimentales pudo sustentarse en la formalidad matemática, y aunque no se presenta en ninguna otra entidad del mundo macroscópico, el establecimiento y su consecuente demostración del principio dual de la luz ha permitido eliminar las posibles contradicciones teóricas internas de la óptica clásica al referirse a la radiación electromagnética;<sup>46</sup> sin embargo, la demostración fue dada matemáticamente y admitida conceptualmente, sin preguntarnos como le hace la radiación electromagnética para asumir el comportamiento que se requiere en el experimento: onda cuando viaja y partícula cuando interactúa con la materia; en este sentido, podría decirse que también la física clásica lleva implícito en su seno la indeterminación, cosa que negamos, aunque nunca ponemos en tela de juicio cómo y por qué se modifica la estructura de la luz.

Es claro entonces que lo que hacemos es depender de una teoría, y es ésta quien tamiza la realidad. Ahora bien ¿por qué negamos la incertidumbre de la teoría clásica?, o ¿cómo explica la física clásica tal comportamiento? La respuesta es que dentro de la teoría clásica no admitimos la duda epistémica debido a que el comportamiento dual es justificado matemáticamente –pues la evidencia empírica ya se tiene– dado que la luz ‘obedece’ la ecuación de onda que se obtiene a partir de las ecuaciones de Maxwell.<sup>47</sup> Es a partir de tales ecuaciones<sup>48</sup> que hemos creado el ideograma de la luz como una onda transversal, y son dichas ecuaciones de quienes se deduce no nada más el

<sup>46</sup> En este caso, y de acuerdo con la teoría electromagnética, la energía en términos de la cantidad de movimiento  $p$  de una onda electromagnética está dada por  $E = pc$ ; análogamente, la energía de un corpúsculo (un fotón, por ejemplo) de masa en reposo  $m_0$  y cantidad de movimiento  $p$  está dada, de acuerdo a la teoría de la relatividad, por:  $E = c(m_0^2 c^2 + p^2)$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz. Claramente se aprecia la naturaleza dual.

<sup>47</sup> Las leyes de Maxwell son cuatro ecuaciones que recopilan, y generalizan, los resultados experimentales de los fenómenos eléctricos y magnéticos. Tales ecuaciones, representadas en forma diferencial (macroscópicamente y en unidades gaussianas) son: (1) Ley de Gauss de la electricidad:  $\nabla \cdot \vec{D} = 4\pi\rho$ ; (2) Ley de Ampère generalizada:  $\nabla \times \vec{H} = \frac{4\pi}{c}\vec{j} + \frac{1}{c}\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ ; (3) Ley de inducción de Faraday:  $\nabla \times \vec{E} + \frac{1}{c}\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$ , y (4) Ley de Gauss para el magnetismo:  $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ . En estas expresiones:  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  son los campos eléctrico y magnético, respectivamente;  $\vec{D}$  es el vector de desplazamiento eléctrico;  $\vec{j}$  es la densidad de corriente;  $\vec{H}$  es el vector de intensidad magnética;  $\rho$  es la densidad volumétrica de carga, y  $c$  es la velocidad de la luz en el espacio libre. Estas ecuaciones se pueden reescribir en el Sistema Internacional, y para ello se introducen, respectivamente, la permitividad eléctrica ( $\epsilon$ ) y la permeabilidad magnética ( $\mu$ ) del medio. (Jackson, J. D. (1973): *Classical Electrodynamics*, 2<sup>nd</sup> Ed; John Wiley & Sons, USA. 1975. pp. 201-218). De hecho, del desarrollo teórico se obtiene que  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \cong 3 \times 10^8$  m/s, que es la velocidad de la luz en el vacío.

<sup>48</sup> En el electromagnetismo es tal la relevancia de estas ecuaciones que: “When combined with the Lorentz force and Newton’s second law of motion, these equations provide a complete description of the classical dynamics of interacting charged particles and electromagnetic fields.” (Jackson., *op. cit.*, p. 218).

comportamiento ondulatorio electromagnético de la luz cuando se propaga, sino que posteriormente permite dar razón de cómo es posible concluir que (la luz) al interactuar con la materia, se comporta como si fuese partícula; es así que

En el modelo de fotones visualizamos cuantos como partículas, cada uno con energía  $\mathcal{E} = h\nu$ . Podemos entonces esperar que un fotón transporte un momentum  $\mathbf{p} = \frac{\mathcal{E}}{c} = \frac{h}{\lambda}$ . [...] Si una onda electromagnética incide sobre un objeto y es absorbida o reflejada, se impartirá momentum a los electrones del material y por consiguiente será transmitida a la red estructural del objeto en su conjunto. La velocidad promedio de transferencia del momentum por unidad de área, o equivalentemente la fuerza por unidad de área, se conoce como *presión de radiación*  $\wp$ . En el caso especial de incidencia normal y absorción completa de la luz que llega, se puede demostrar que  $\wp = I/c$ .<sup>49</sup>

Las razones dadas anteriormente funcionan como condiciones necesarias y suficientes tanto para el tránsito como para la interacción de la luz con la materia. Aún así, podría argumentarse que las razones dadas no son más que manipulaciones matemáticas que nos conducen, obligadamente, a lo que se encuentra en los experimentos. No obstante, debe quedar en claro que partiendo de cuatro ecuaciones fundamentales hemos llegado a dar razón del porqué del comportamiento de la naturaleza dual de la luz, aunque pasemos por alto la pregunta crucial de cómo le hace la radiación para pasar de onda a partícula, y viceversa. Esto es lo que frecuentemente despierta inquietudes acerca de qué es la naturaleza, y si en verdad la conocemos, pues “Realmente es muy poco lo que se ha logrado en tres mil años a pesar de que cada día se acelera más el paso. En efecto, es maravilloso observar que la pregunta ¿qué es la luz? Continúa inmutable”.<sup>50</sup>

Ahora bien, si la luz se comporta análogamente a los objetos atómicos, entonces ¿por qué en un caso se admite la explicación y en el otro no?, es decir, ¿por qué en el caso clásico se acepta que la teoría es explicativa mientras que en el caso cuántico se admite que la teoría es instrumentalista? ¿Sólo por la deducción matemática? Desde mi punto de vista, ambas teorías afrontan la misma problemática con objetos como la luz y los objetos atómicos; sin embargo, en el caso clásico se dan una explicación conceptual –la perturbación del campo electromagnético– y un desarrollo matemático que desembocan conjuntamente, a partir de las cuatro ecuaciones elementales del electromagnetismo –las leyes de Maxwell–, en propagación de las ondas luminosas y su relación con el comportamiento corpuscular, mientras que en el caso cuántico no se sabe de un sustrato

---

<sup>49</sup> Hecht-Zajac., *Óptica...* pp. 50-51.

<sup>50</sup> *Ibid.*, ... p. 11.

teórico más profundo (que la ecuación de de Broglie) que nos permita elucidar por qué el objeto atómico adopta el comportamiento ondulatorio-corpúscular.<sup>51</sup>

Pero creo que todavía hay más coincidencias, pues tanto el comportamiento de la luz como los fenómenos cuánticos se han manifestado independientes de cada uno de nosotros como observadores, al comportarse preferentemente de un modo u otro bajo circunstancias similares en diversos experimentos –a menos que se altere la observación, pues se interrumpe el evento– en cualquier parte del orbe variando, a lo más, la explicación que podamos dar acerca del conocimiento del suceso. Así entonces, el problema del conocimiento del objeto atómico se reduce no a qué tipo de ente clásico queremos que aparezca en el experimento que desarrollamos, pues eso ya lo sabemos, sino más bien en encontrar cómo aclarar por qué se nos presenta un tipo de ente en particular, o qué basamento matemático-conceptual nos brinda la posibilidad de acceder a tal hecho; es decir, no se tiene a la mano dentro de la teoría un conjunto de ecuaciones básicas que pueda llevarnos a mostrar que el objeto atómico es, efectivamente, onda y partícula. Cabe decir que la ecuación de de Broglie liga ambos conceptos, pero es una expresión que se dedujo de evidencias experimentales. Asimismo, la conceptualización que tenemos de los objetos atómicos no ha podido ilustrar como le hace el objeto para decidir qué tipo de representación adoptar, siendo esto el meollo del asunto. Ya sabemos que (valga la reiteración) por la analogía experimental que guardan entre sí las entidades subatómicas y la radiación electromagnética, cuando los objetos atómicos decidan propagarse lo harán en forma de onda, mientras que cuando decidan interactuar con la materia, lo harán corpuscularmente; sin embargo, es esta incertidumbre epistémica (clásica) lo que nos impide, bien sea teórica o experimentalmente, a llegar más profundo, dejándonos siempre con el recelo de si en verdad tal impedimento no es más que una restricción teórica que nos imponen, al alimón, los principios de Incertidumbre de Heisenberg (PIH) y el de Complementariedad de Bohr (PCB).

Son los postulados anteriores quienes vertebran el cuerpo de la teoría cuántica y que, al no poder solucionar el problema teórico de la naturaleza dual de los objetos atómicos, la han orientado a ser, en vez de teoría explicativa, una teoría instrumentalista o descriptiva; sobra decir que los principios mencionados acentúan la incertidumbre

---

<sup>51</sup> Por ejemplo, la teoría cuántica de la luz explica las ondas luminosas asegurando que éstas se deben a variaciones de la amplitud de probabilidad del fotón. Nuevamente aparece relacionada, indisolublemente, la onda con la función de onda.

conceptual en la teoría, y sería mejor, quizá, re-etiquetar o renombrar los objetos atómicos.

#### **4.4 ¿La Mecánica Cuántica es explicativa?**

Aún así, pienso que la física cuántica no es enteramente instrumentalista dado que permite visualizar, así sea levemente y de manera probabilística, cómo puede ser (o es) el funcionamiento de la realidad microscópica, además de permitirnos inferir la existencia de partículas nuevas, crear nuevos elementos químicos o deducir comportamientos naturales que antes no se habían detectado, inclusive, apoyándose en una relación causal-probabilista. Esto me lleva a suponer que la teoría cuántica es realista en el ámbito atómico y cuando nos referimos puramente a los procesos experimentales –puesto que el objeto dual es una criatura real y con características propias–, además de que también considero que es explicativa (o semi-explicativa) en los aspectos teóricos ya que, al predecir el acontecer de los sucesos cuánticos y mostrarse éstos en consonancia con el suceder natural, entonces debe haber, obligadamente, un nexo entre teoría y realidad, lo que hipotéticamente nos permite dudar si la realidad no es de naturaleza lógica, y en caso de que fuese afirmativa la respuesta, entonces podría decirse que la realidad es un ente que funciona matemáticamente, por lo que nuestra tarea consiste en encontrar el modelo que describe su funcionamiento.<sup>52</sup>

Sin embargo, el problema para sostener que la teoría cuántica es semi-explicativa es complicado, pues no es fácil suministrar bases firmes a tal aserción, primero, porque desconocemos bien a bien qué es la realidad y cómo funciona, y después, porque la teoría cuántica –por no poder ingresar vívidamente al universo atómico– carece de sustratos o elementos teóricos más elementales que fomenten el intuicionismo de la teoría, de tal suerte que es “La naturaleza no intuitiva de la mecánica cuántica –o más bien, de la propia naturaleza en el nivel de actividad mecanocuántica– lleva a muchos a desesperar de encontrar imágenes fidedignas de los fenómenos a nivel cuántico”,<sup>53</sup> además de que es “Una opinión común entre muchos físicos de hoy es que la mecánica cuántica ¡no nos ofrece ninguna imagen de la «realidad» De acuerdo con esta opinión, el

---

<sup>52</sup> Recuerdo y coincido con la frase de Galileo de (cito de memoria): “La matemática es el alfabeto con el cual Dios ha escrito el Universo”. La mecánica cuántica parece ser que se apoya en tal supuesto.

<sup>53</sup> Penrose., *El camino a la realidad...* p. 711.

formalismo de la mecánica cuántica es tan solo eso: un formalismo matemático”.<sup>54</sup> De hecho, una de las críticas más interesantes y consistentes emprendidas contra la mecánica cuántica proviene de Popper,<sup>55</sup> al censurarla por no ser realista. ¿Pero por qué no es realista? Tal como mencioné, al entrar al laboratorio a experimentar y al obtener resultados aproximadamente iguales en forma reiterada –considerando las variaciones típicas de la misma naturaleza de las mediciones y sus respectivas incertidumbres–, me es claro que existe una realidad a la que nos acercamos poco a poco y que no depende de nosotros, que está allí y que seguirá estando cuando ya no estemos. Asimismo, pienso que procediendo de tal manera damos testimonio de lo que es el mundo natural, acercándonos paulatinamente a conocer algunas características de su constitución y comportamiento con mayor precisión y verosimilitud; simultáneamente, él (el mundo natural) lo atestigua, “permitiendo” que lo observemos, exploremos e inclusive, lo modifiquemos –a veces sustancialmente, ya no nada más en el medio ambiente, sino también en la genética de los seres vivos, sean vegetales o animales–.

Asimismo, estoy consciente que la realidad no es invención mía, puesto que todos los que hemos realizamos experimentos percibimos –aunque en forma aproximada, y dentro de ciertos parámetros estándares, si se quiere– más o menos lo mismo. Pero, para argumentar que la realidad no es producto de mi imaginación, pongo por ejemplo el caso de los fósiles de los dinosaurios. ¿De dónde salieron, si yo nunca los conocí? O ¿Qué hay con los estados de agregación de la materia? Yo no los descubrí. ¿Y del experimento de difracción de electrones? Cualquiera puede realizarlo, y obtendría los mismos resultados. Supongo que si todo fuese invento mío, mi mente se trastornaría por completo; por de nosotros.

Ahora bien, la intención de toda teoría es, en primera instancia, dar una descripción puntual y precisa de algunos eventos que ocurren en la naturaleza; posteriormente, se busca que la teoría profundice más y explique el acontecer. En ese sentido, la teoría brinda un esquema o representación de lo que es la realidad; si esta representación permite predecir y proporciona suficientes elementos como para esclarecer el por qué de la ocurrencia de las cosas, además de que permita inferir otras posibles consecuencias, y si se apega con precisión al hecho real, entonces podemos tener la confianza de que la

---

<sup>54</sup> *Ibid.*, p. 1049.

<sup>55</sup> *Cfr.* Capítulos 2 y 3.

teoría explica la realidad.<sup>56</sup> De hecho, esto es lo que pregona Popper cuando defiende su postura acerca del realismo, a la que denomina “la tesis de la realidad del mundo”.<sup>57</sup> Para ello, arguye que la ciencia, la filosofía y el pensamiento racional deben surgir todos del sentido común. Pero aquí radica un gran problema, pues el sentido común

...describe las creencias o proposiciones que parecen, para la mayoría de la gente, como prudentes, sin depender de un conocimiento esotérico, investigación o estudio. El sentido común es el primero de los sentidos internos. Según la doctrina clásica, con respecto a éstos, que los clasifica en sentido común, imaginación, memoria y estimativa-cogitativa en el hombre. El sentido común no es el «buen sentido», «común» a todos los hombres, es decir, la inteligencia en su actividad espontánea, o la razón en el sentido cartesiano de poder distinguir lo verdadero de lo falso. Aunque sea una acepción corriente, esta asimilación supone un cambio de significación con respecto a la doctrina clásica, que configura el sentido común como un sentido, una función del conocimiento sensible: su objeto no es abstracto y, por tanto, no es una función intelectual.<sup>58</sup>

Así pues, y tal como se ve, efectivamente el sentido común resulta ser algo “vago y cambiante” que maneja Popper. De hecho, él propone que toda “ciencia y toda filosofía son sentido común ilustrado”<sup>59</sup>, además de señalar que se parte del sentido común, y lo que propicia el progreso de las ciencias es la crítica.

Pero la ciencia y su progreso requiere algo más que sentido común y criticismo, pues si bien es cierto que tiene a aquél como fundamento, requiere también de un método lógico que la sustente, además de emplear un lenguaje claro y conciso que evite las posibles ambigüedades que suelen estar asociadas al lenguaje; esto me hace pensar que el quehacer científico y en general, la ciencia, es ‘un algo’ más refinado que trasciende el sentido común; y es sin duda tal lenguaje lo que ha permitido el avance de la ciencia y la tecnología, posibilitando incluso encontrar entidades físicas reales (v. g., el caso más espectacular: el descubrimiento del positrón) mediante el desarrollo teórico solamente. Ahora bien, se supone que el realismo es esencial al sentido común, y éste permite distinguir entre apariencia y realidad (la realidad que aprehendemos sensorialmente, supongo, no aquella realidad profunda que tal vez desconozcamos por siempre jamás),

---

<sup>56</sup> En este sentido, la existencia de las entidades atómicas está exento de dudas, quedando a discusión la interpretación del por qué de su comportamiento, buscando siempre acercarlo a la realidad (con todo lo que eso signifique). Es así que en el seno de la propia mecánica cuántica han surgido varias ontologías (algunas cuestionadas por Einstein y Popper) asociadas al formalismo cuántico –que es lo único, dentro de la misma teoría, admitido incondicionalmente–, de entre las que destacan: “(a) (la interpretación de) «Copenhague», (b) muchos universos, (c) decoherencia por el entorno, (d) onda piloto y (e) nueva teoría con **R** objetiva” (Penrose., *El camino a la realidad...* p. 1055). Es probable que estas discusiones continuarán un buen tiempo.

<sup>57</sup> Popper, K. R. (1998): *Conocimiento Objetivo. Un enfoque evolucionista*; Tecnos, Madrid. p. 42.

<sup>58</sup> Tomado de: [http://es.wikipedia.org/wiki/Sentido\\_com%C3%BAn](http://es.wikipedia.org/wiki/Sentido_com%C3%BAn)

<sup>59</sup> Popper (1998)., *Conocimiento Objetivo. Un...* p. 42.

entonces, y de acuerdo a esto, la física cuántica, al igual que la física clásica, es realista pues los objetos atómicos no son ilusiones más, al ser detectados por los instrumentos y exhibir efectos inobjetables que cualquiera puede verificar, es decir, efectos fríos, objetivos e impersonales. Más todavía, pues si nos basamos en los logros predictivos de la teoría, y de acuerdo con las nociones de verdad y contenidos lógicos tarskianos que Popper cita: “la verdad es la correspondencia con los hechos –o con la realidad– o, más exactamente, una teoría es verdadera si, y sólo si, corresponde a los hechos”,<sup>60</sup> entonces, la mecánica cuántica, bajo tales contenidos, es indubitavelmente verdadera.

Pero ¿verdadera en qué sentido? ¿Acaso explica cómo es la realidad? Depende cómo veamos esa entidad que llamamos realidad. Según aprecio, sí lo hace, igual que lo hace la física clásica (aun estando restringidas a la realidad física); pero parece ser que la realidad atómica no es igual a la realidad macroscópica, según se empeñan en mostrarnos los experimentos. Pero además, quizá la realidad física no sea la realidad trascendental, aquélla que buscaban los griegos. Entonces, ¿cómo llegamos a la realidad? Quizá sea imposible hacerlo totalmente, aunque podríamos aceptar que nos acercamos a ella, haciéndolo al imponer el equivalente al proceso de límite (es decir, algo análogo a lo que se hace en matemáticas pues si supiéramos cuál es la realidad, digámosle  $x_0$ , podríamos entonces encontrar una vecindad  $U$  centrada en  $x_0$  y con  $x \neq x_0$ , de tal suerte que pudiéramos obtener el  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = b$  cuando  $x \rightarrow x_0$ , con  $x \in U$ , y con  $x_0$  que se encuentra en el conjunto de datos ‘reales’ por explorar, que no es más que el dominio de la función; y  $b$  se hallaría en el codominio de  $f$ , que serían los datos evaluados),<sup>61</sup> o bien, imponer algo parecido al radio  $r$  de convergencia de una serie. Claramente, aquella teoría que cumpla con tales requisitos, o bien, con algunos requisitos necesarios (impuestos como criterios) para admitir que ‘explica la realidad’, será la que esté más cerca de la verdad –quizá más como aspiración que como algo real y tangible–, y con eso se subsanaría el dilema. Esto lo digo porque la física cuántica ha mostrado una concordancia impresionante con los hechos, pero no estamos conformes con el concepto de realidad subatómica que nos muestra, pues siempre aspiramos a conocer la realidad tal como es (que quizá no sea más que una quimera. Por eso Newton buscó, en su

---

<sup>60</sup> *Ibid.*, p. 51.

<sup>61</sup> Para una definición más precisa de esto, puede consultarse: Marsden, J. E. & Tromba, A. J. (1976): *Cálculo Vectorial*; Addison-Wesley Iberoamericana S. A. México, 1987. pp. 72-73.

explicación, desproveer la física de conceptos metafísicos), y visto de este modo, la teoría cuántica resulta no ser instrumentalista.

Efectivamente, la teoría cuántica no se cuenta entre las teorías explicativas o realistas pues, de inicio, hay reiteradas dudas hasta de la existencia de las entidades subatómicas, considerándolas solamente entidades teóricas inobservables; y en el mejor de los casos, aun aceptando su existencia, subsiste el problema epistémico de su naturaleza, tal y como señalé antes. Esto es comprensible y se debe, pienso, a que la teoría carece de postulado primigenios irreductibles –como la Ley de Coulomb o la Ley de Biot y Savart, sustento de las leyes de Maxwell– que favorezcan deducciones continuas, suaves y generales en cualquier experimento atraído por la teoría –porque como he mencionado, muchas de sus leyes son adecuadas al evento, lo que la convierte, aparentemente, en un simple instrumento de medición–; es por eso que se la considera instrumentalista. Pero, si pensamos que cualquier teoría comienza por no ser más que una heurística que nos permite ir sumergiéndonos en la realidad para ver cómo funciona, y después, si a tal heurística le vamos dotando de propiedades y atributos cada vez más potentes conforme se le adicionan leyes y supuestos teóricos más y más profundos y más vastos, entonces, es sencillo entrever que esta masa conceptual puramente legaliforme va adquiriendo un cuerpo lógico-formal bien imbricado y altamente estructurado que termina por representarse matemáticamente y se confronta con la realidad que estudia; además, la representación simbólica debe poseer, de suyo, toda la fortaleza teórico-conceptual requerida para inferir eventos novedosos e inclusive, poco ‘intuibles’. Este es el caso de la teoría cuántica, que a más de ser funcional, nos permite adentrarnos en la naturaleza subatómica, así sea matemáticamente y, si comparamos las predicciones teóricas y su asombrosa concordancia con los eventos reales, y dado que no sabemos cómo es la realidad en toda su esencia, es factible suponer que la realidad es de naturaleza matemática. Si tal fuera el caso, cosa que aparenta ser cierta (validan esta suposición los espectaculares avances científicos y tecnológicos actuales en las distintas esferas del conocimiento humano, avances altamente sofisticados y soportados por la matemática), entonces la teoría cuántica, sin duda alguna, es (semi) explicativa.

Y es obligado pensar detenidamente si verdaderamente un desarrollo puramente matemático describe la realidad, aunque parezca que son concepciones distintas pues a veces, al observar la naturaleza, vemos que se comporta extrañamente, digamos que incluso, ilógicamente. Pero habría que ver qué hay de cierto en ello, pues desconocemos

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

cuál es su funcionamiento o bajo qué leyes se rige. Esto lo digo porque me parece improbable una naturaleza puramente azarosa. Aún así, y concediendo que no existiese logicidad en lo más recóndito de la realidad, no deja de ser sorprendente cómo hay coincidencia en los resultados obtenidos matemáticamente y los resultados experimentales. Si esta concordancia es una mera coincidencia, entonces habremos de esperar cuánto tiempo dura; en lo particular, prefiero pensar que la realidad mantiene una cualidad, atributo o sustrato de naturaleza matemática, que es lo que le da fortaleza, objetividad y sentido a la ciencia. Esto es porque me parece innegable que cuando intentamos explicar la ocurrencia de los eventos lo primero que hacemos es abstraerlos y modelarlos, imponiéndole cierto orden secuencial y lógico; pero esa lógica sólo pudiera residir en nuestra estructura mental, y no en el medio natural. Sin embargo, cuando matematizamos la realidad lo que estamos haciendo es imponer ciertas condiciones lógicas que transferimos íntegramente al medio natural, estableciendo una relación uno a uno, amparados en el supuesto de que la experiencia nos ha mostrado que la mayoría de las veces tal método funciona bastante bien, y que nos permite explicar –así sea matemáticamente– el acontecer natural. Pero en este caso estamos hablando de sólo un atributo que pudiera tener la realidad de entre muchos posibles; sin embargo, si la realidad es parcialmente matemática entonces la hemos estado explicando parcialmente desde casi siempre, con lo que la teoría cuántica es parcialmente explicativa y se distanciaría del estadio de teoría descriptiva, mensurable u operativa.

Y es que la representación matemática del medio natural juega el papel de código que nos permite descifrar el lenguaje natural, además de fungir como lupa o filtro (intuitivo) que nos permite ‘ver’ –en sentido figurado– cómo es el mundo; en este sentido, y en especial en la teoría cuántica, nos faltaría únicamente asociar una imagen conceptual o ideográfica a los sucesos cuánticos para concatenar eventos (es decir, una relación causalista) para explicar satisfactoriamente la evolución del sistema. Esto es lo que precisamente hace la teoría clásica al asignarles una relación lógica y pictográfica coherente a la ocurrencia de los sucesos, y eso sería lo que le falta hacer a la teoría cuántica.

De hecho, la teoría cuántica buscó inicialmente cómo apoyarse en la iconografía conceptual de la física clásica para explicar la realidad cuántica, convencida de que la realidad puede representarse simbólicamente; para ello promovió la intuitividad conceptual, apoyándose en las imágenes o conceptos clásicos de partícula y onda. El

fomento del uso de tales ideas es lo que da pie al desarrollo de las teorías matricial y ondulatoria, sin embargo, aun cuando se demuestra la equivalencia de ambas teorías, no ha sido posible explicar detalladamente el por qué de la superposición de las susodichas imágenes, tal y como lo hacen las ecuaciones de Maxwell con la luz. Para subsanar este problema y darle coherencia y logicidad a la teoría, la física cuántica asumió la dualidad onda-corpúsculo como un hecho incontrovertible que deviene de las experiencias experimentales y lo postula como una propiedad intrínseca de la materia, con lo que la dualidad se asume como la verdadera naturaleza de los objetos atómicos.

Esto ha logrado que el problema cognitivo de la comprensión respecto a la coexistencia de imágenes clásicas quede, al menos parcialmente, superado. Esta superposición de imágenes excluyentes clásicamente fue posteriormente avalada y reforzada por los desarrollos matemáticos que conforman el cuerpo principal de leyes cuánticas; tales desarrollos los llevaron a cabo Born, Bohr, Dirac y Heisenberg, y vinieron a resolver parte de la problemática conceptual en que se hallaba inmersa la física cuántica. La entronización y jerarquización de postulados esenciales para la teoría –entre ellos el de la dualidad, enunciado por PCB– impusieron orden y sentido lógico a la teoría, lo que permitió deducir posteriormente una gran cantidad de leyes empíricas. A pesar de ello, la teoría no está libre de cuestionamientos, pues como he dicho, faltan axiomas irreductibles básicos, de tal suerte que den a la teoría una cosmovisión más natural y permitan desglosar sistemas cuánticos complejos en subsistemas más simples y fácilmente solucionables, tal y como se hace dentro de la física clásica, haciendo a un lado la necesidad de introducir leyes *ex professo* a cada evento. Nagel camina en el mismo sentido, al decir con toda propiedad que:

[...] Habitualmente se formula la teoría en términos de un modelo y se postulan explícitamente varias especies distintas de “partículas” y “procesos” subatómicos. Como en el caso de todas las teorías, especialmente las teorías microscópicas, los elementos de juicio empíricos a favor de los postulados de la teoría cuántica son lógicamente incompletos y están conectados con las suposiciones fundamentales mediante largas cadenas de deducciones y muchas hipótesis subsidiarias. Además, los elementos de juicio empíricos no están en un acuerdo total con las leyes numéricas deducidas de la teoría, si bien las discrepancias caen, en general, dentro de los límites del error experimental. En estos aspectos, no hay nada nuevo en la teoría cuántica”.<sup>62</sup>

---

<sup>62</sup> Nagel., *La estructura de...* pp. 272-273.

## 4.5 Heisenberg y la incertidumbre

En el caso de la teoría cuántica, la introducción de la concepción dual –y sus muchas objeciones, entre otras– ha dado un sinfín de frutos, y todos ellos de suma delicia, bien sea en los aspectos físico, matemático, filosófico e incluso, *especulativo*. Uno de tales frutos es el Principio de Incertidumbre de Heisenberg, quien dedujo las expresiones:<sup>63</sup>

$$\frac{\Delta x \Delta p_x \geq \hbar}{\Delta E \Delta t \geq \hbar}, \text{ con } \hbar = \frac{h}{2\pi} \text{ ----- (6)}$$

partiendo del formalismo matemático introducido en la teoría por Paul A. M. Dirac y Pascual Jordan.<sup>64</sup>

Las expresiones anteriores reciben también el nombre de Principio de Indeterminación porque señalan la imprecisión que siempre está presente cuando se intenta determinar el producto de variables conjugadas (por ejemplo, posición y cantidad de movimiento lineal, o energía y tiempo, entre otras). Dichas ecuaciones llevan implícito el carácter estadístico asociado a una medición, puesto que el símbolo  $\Delta$  representa, dentro de la física, la incertidumbre asociada a toda medición.<sup>65</sup>

---

<sup>63</sup> La primer expresión se generaliza a tres dimensiones, solamente cambiando la variable cinemática  $x$  por  $y$  o  $z$ , y en la cantidad de movimiento, introduciendo los subíndices  $y$  ó  $z$ , según sea el caso.

<sup>64</sup> Si se parte de los postulados de la mecánica cuántica, el principio de incertidumbre resulta ser más un teorema que un principio. Sin embargo, este último nombre ha permanecido inmutable a través del tiempo, siendo una especie de ‘error histórico’, análogo al de la *fem* (fuerza electromotriz) en la electricidad. (Una demostración de cómo se obtiene la ecuación de Heisenberg se encuentra en: Saxon., *Elementary Quantum...* pp. 113-116.

<sup>65</sup> La física –y en general, en las ciencias naturales, puras o aplicadas– depende de la observación y de la experimentación, donde por *observación* entendemos el examen cuidadoso y crítico de un fenómeno, donde el observador identifica, mide y analiza los diversos factores y circunstancias que influyen en dicho fenómeno; la experimentación en cambio, no es más que la observación de un fenómeno en condiciones cuidadosamente controladas (y quizá previamente organizadas y planeadas) que permiten al experimentador la revelación de la forma en que éstas afectan al proceso. Sin la experimentación y la medición, la ciencia moderna jamás habría logrado los avances actuales.

Por medición significamos el proceso mediante el cual podemos cuantificar nuestra experiencia del medio que nos rodea; en el caso de las ciencias fácticas tal experiencia proviene de nuestra interacción con el medio ambiente. Las mediciones son la columna vertebral de la experimentación; sin el conocimiento y adecuado manejo de las mediciones, difícilmente habríamos alcanzado el conocimiento que poseemos. Pero cuando hacemos mediciones e informamos sus resultados, no debemos olvidar que las medidas no son números exactos, sino que consisten en intervalos dentro de los cuales tenemos confianza de que se encuentra el valor esperado. Así, el acto de la medición requiere que determinemos tanto la localización como la anchura de ese intervalo. Empero, no existen reglas para determinar el tamaño del intervalo, porque dependerá de muchos factores inherentes al proceso de medición, ya que cada situación debe evaluarse en forma individual.

Es obvio entonces que los errores aparecerán cuando se lleve a cabo cualquier tipo de medición, volviéndose vital el manejo de la teoría de errores en la experimentación, debiéndose subrayar su relevancia en todo

La interpretación física de tal principio es clara, si bien no deja de causar asombro, puesto que nos impone una cota inferior del error hasta donde podemos llegar mediante técnicas experimentales, además de asegurarnos que nada más se pueden medir una u otra de las variables dinámicas conjugadas que aparecen en la expresión (6), pero no se pueden medir ambas simultáneamente; dicho de otra manera, la ecuación impone la restricción de que, o nos damos cuenta del estado dinámico del sistema, sacrificando el conocimiento geométrico o posicional, o bien, accedemos a las variables geométricas o cinemáticas a cambio de renunciar a conocer el comportamiento cinético del objeto; esto se debe a que las variables que aparecen en esta ecuación son variables relacionadas con los aspectos clásicos relativos a la descripción completa del sistema: se entremezclan variables que indican la naturaleza geométrica o cinemática asociada al objeto en un referencial determinado, y variables asociadas a la cinética del sistema. Nótese que no se especifica si el referencial es inercial o no, pues no tiene sentido imponer tal restricción.<sup>66</sup> Este principio, desde su promulgación –y postulación en Copenhague–, ha llamado la

---

proceso que involucre mediciones y manejo de datos, pues es lo que nos lleva a sentar las bases que garantizan mayor veracidad y confianza en todo trabajo experimental.

Por otra parte, la habilidad de un individuo para realizar una medición depende únicamente de él y no de los instrumentos de medida. Sin embargo, esto conlleva el riesgo del subjetivismo –que se busca sea minimizado–. Para eliminar tal riesgo, dentro de las ciencias experimentales se han creado técnicas y métodos bien definidos que brindan una mejor estimación de las incertidumbres involucradas en el proceso de experimentación. Es así que en todo experimento, y a toda variable experimental, se le asocia un error conocido como *incertidumbre* de la variable, y que da un valor único; comúnmente se denota por  $\Delta$ , y se le conoce como *precisión o límite de resolución* del instrumento que se está usando. Esto se expresa como:  $\Delta E = \pm (1/2) P$ , donde  $\Delta E$  es la incertidumbre de escala y  $P$  es la precisión (o mínima lectura) del instrumento.

Ahora bien, cuando el conjunto de datos recolectado del experimento tiende a agruparse alrededor de un valor medio, decimos que los datos son tendencia central, y para estimar la incertidumbre de la medida basta determinar el valor promedio del conjunto y calcular un promedio de las discrepancias o desviaciones de todas las medidas. Puesto que el promedio de las desviaciones es cero, lo más razonable es calcular el promedio del cuadrado de las desviaciones; la suma de los cuadrados de las desviaciones divididas por el número de observaciones será una medida de qué tan dispersos se encuentran los valores del conjunto. Si este promedio del cuadrado de las desviaciones es muy pequeño, significa que todos los valores difieren poco del valor promedio, y en consecuencia, la incertidumbre es pequeña. Si por el contrario, los valores difieren mucho, los valores se encuentran muy dispersos y la incertidumbre es grande. La estadística le ha dado el nombre de *varianza* al promedio del cuadrado de las desviaciones, y a su raíz cuadrada, el de *desviación típica o desviación estándar*. Esta última representa la incertidumbre en una medida calculada a partir de un conjunto de ellas. La desviación estándar  $\sigma$  (que en física se representa por  $\Delta$ ), está dada por:

$$(\Delta =) \sigma = \left| \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n} \right|^{1/2}$$

Donde  $\bar{x}$  = promedio del conjunto de datos. Así que, cuando indicamos la incertidumbre de  $x$  como  $\Delta x$ , queremos significar que  $x \in [x - \Delta x, x + \Delta x]$ . (*Prácticas de Laboratorio de Física. Manual de Teoría de Errores*. C. Salvador Medina Rivera; Centro de Ciencias Básicas; UAA. 1995. pp. 1-7).

<sup>66</sup> En el capítulo 5 se estudiará con más detalle este principio.

atención de físicos y filósofos y desde entonces ha sido fundamental en la ciencia y la técnica.

De hecho, fue buscando imponer orden en la aun joven teoría cuántica cuando Heisenberg dedujo su principio de incertidumbre buscando, antes que nada, eliminar las posibles inconsistencias internas; es decir, de alguna manera buscó reformular la mecánica cuántica teniendo presentes no sólo los resultados experimentales, sino también los desarrollos teóricos alcanzados. Era necesario hacerlo pues había que dotar de eficiencia el entramado conceptual que apenas se avizoraba. Quizá sea ese el motivo por el que Popper asegura que

Heisenberg empezó, en su intento por asentar la teoría atómica sobre una nueva base, con un programa epistemológico: el de librar a la teoría de «inobservables», esto es, de magnitudes inaccesibles a la observación experimental; podríamos decir, el de librarla de elementos metafísicos.<sup>67</sup>

Y es que efectivamente, Heisenberg buscaba averiguar cómo es que los experimentos mostraban a los objetos atómicos con propiedades ondulatorias en algunos casos, y con propiedades corpusculares en otros. Esto lo condujo a sus famosas expresiones, buscando limitar los aspectos paradójicos que surgen de pretender conciliar imágenes clásicas tan disímbolas como lo son una onda y una partícula.

Heisenberg dedujo entonces sus expresiones de incertidumbre y con ello impuso un límite a la información que se recaba del mundo atómico: el cuanto de acción, diciéndonos que nada más pequeño se puede conocer; por lo anteriormente expuesto (y supongo que después de juzgar que ya no se puede ir más allá de lo que el principio impone) y para evitar dudas e indagaciones adicionales a las ya existentes, se decidió postular que era innecesario seguir hurgando en la teoría, por lo que se propuso que la teoría era completa y que no sufriría cambios de ninguna índole en los aspectos esenciales y limitantes con el avance del tiempo. En esto, me parece que, en cierto sentido, se procedió de una manera previsible en ese momento (aunque sólo valía para ese momento) puesto que había muchas interrogantes que emanaban de la teoría.<sup>68</sup> Asimismo, Heisenberg inicialmente

---

<sup>67</sup> Popper., *La Lógica de la Investigación...* p. 203.

<sup>68</sup> Aun hoy aparecen muchas cuestiones por aclarar. Penrose señala, por ejemplo, al hablar del colapso de la función de onda (o reducción del vector de estado) que “De hecho, cabría imaginar que en realidad esta es una aproximación a alguna otra cosa todavía desconocida. ¿Es posible que exista una ecuación matemática más general, o un principio de evolución de un tipo matemático coherente, del que U (la ecuación de Schrödinger) y R (reducción de estado) son aproximaciones límite? Mi opinión personal es que es muy probable que un cambio de este tipo para la teoría cuántica sea correcto –quizá como parte de una nueva física del siglo XX–.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

buscó como tratar de llevar la nueva teoría a ‘congeniar’ con la teoría clásica, pero se dio cuenta que ésta está impedida para dar una descripción completamente admisible de las partículas atómicas, pues éstas son, prácticamente, “indeterminadas”.<sup>69</sup>

Pero si bien Heisenberg nunca olvidó que las teorías científicas juegan el mismo papel que los lentes en las personas adultas o con problemas de la vista: nos ayudan a ver mejor nuestro entorno y, conforme transcurre el tiempo, deben actualizarse para que sigan cumpliendo su función, no admitió los (posibles) cambios que podría sufrir, conforme avanzara el tiempo, la teoría cuántica, pues para él era una teoría terminada. En lo que a mí respecta, pienso que la teoría cuántica, incluidas las ecuaciones de indeterminación, pudieran no ser inmutables y además, en cuanto que creación humana, son susceptibles de ser modificadas en un futuro quizá no muy lejano.<sup>70</sup> Bastaría con encontrar un evento que no sea explicado por la teoría, y ésta deberá ser revisada desde sus bases. Eso eliminaría, y de raíz, la idea de completitud pregonada por Heisenberg y admitida posteriormente por muchos científicos.<sup>71</sup>

Hoy día, por ejemplo, estudios recientes que se vinculan con la teoría de la gran unificación (TGU) estudian la mecánica cuántica y sus modalidades, desarrollando métodos matemáticos muy precisos para la física de altas energías o la física de partículas, pues con el paso de los años los físicos han querido comprender todas

las implicaciones extrañas de la teoría (cuántica), superposiciones, dualidad onda-corpúsculo o el papel del observador en las medidas por mencionar algunos. Ahora, una nueva proposición para una ley de la Física (la ecuación de onda de Evans) que describe la geometría de la realidad física podría ayudar a responder algunas de estas cuestiones.<sup>72</sup>

---

[...] Sin embargo, la mayoría de los físicos no parecen creer que sea fructífero seguir este camino. Su razón para preferir no alterar el marco básico de la mecánica cuántica es (además de la gran elegancia matemática de su formalismo  $U$ ) el acuerdo extraordinariamente impresionante y preciso que hay entre la teoría cuántica y los hechos experimentales, en los que no se conoce nada que contradiga la teoría (en su forma híbrida actual) y muchos resultados diversos la confirman con gran precisión. (Penrose., *El camino a la realidad...* p. 713).

<sup>69</sup> El electrón, por ejemplo, tiene un radio de  $10^{-16}$  m. Esto vuelve sumamente difícil medirlo (y acaso, intuirlo), por lo que sólo proponemos imágenes operativas para relacionar conceptos teórico-matemáticos con datos experimentales.

<sup>70</sup> Tal como parece ser que actualmente está ocurriendo. Para mayores detalles, ver: [http://aias.us/documents/spanish/Capitulo\\_3.pdf](http://aias.us/documents/spanish/Capitulo_3.pdf). Asimismo, de acuerdo a los estudios de Evans, es posible alcanzar una nueva proposición para una ley de la física que describa la geometría de la realidad física

<sup>71</sup> De hecho, se espera probar la existencia de los mesones másicos en el colisionador de hadrones (LHC). En caso de resultar negativa la existencia de tales partículas subatómicas, será necesario retomar la teoría y revisarla.

<sup>72</sup> T. N. Palmer. (2009).pdf: *The invariant set postulate: a new geometric framework for the foundations of quantum theory and the role played by gravity*; en: Physics.org. Proceedings of the Royal Society A. doi:10.1098/rspa.2009.0080. Ya está en la web, con dirección: <http://neofronteras.com/?p=2804>

Y es que las interrogantes que surgen del principio de Heisenberg son muchas, y su elucidación a través del tiempo no ha dejado en claro los ‘por qué’ detrás de las matemáticas, aun cuando los ‘cómo’ sabemos que están bien desarrollados.

Aún así, actualmente admitimos que las expresiones de Heisenberg han impuesto, y de manera tajante, una frontera, hasta este momento, infranqueable a toda concepción humana de lo ultrapequeño, pues han introducido la imprecisión como un factor inmanente e irrenunciable al conocimiento; de hecho, Heisenberg se refiere así desde su aparición, pues

En la primavera de 1927 nacieron luego las relaciones de incertidumbre, que tendrían definitivamente el puente a la interpretación estadística de la teoría cuántica. [...] Dichas relaciones vienen a decir que dos determinantes de un sistema –cuyo conocimiento simultáneo es necesario en la física clásica para determinar completamente el sistema– no pueden ser conocidas, en la teoría cuántica, con precisión absoluta al mismo tiempo, o lo que es lo mismo, que entre las incertidumbres o imprecisiones de esas magnitudes existen relaciones matemáticas que impiden el conocimiento exacto de ambas a la vez.<sup>73</sup>

Pero Heisenberg fue más allá, pues al analizar a fondo sus expresiones de incertidumbre y su relación directa con la estadística asociada a la experimentación, concluyó la inexistencia de una causalidad estrictamente determinista, por lo que al presentar a la comunidad científica sus ecuaciones exclamó: “esta limitación a la precisión, impuesta por la naturaleza, hace que, en un cierto sentido, la ley de la causalidad resulte inválida”.<sup>74</sup> De inmediato aparecieron las inconformidades, y no nada más las filosóficas, aun cuando ningún otro desarrollo teórico había tenido (y sigue teniendo) tantísimo éxito para explicar los resultados experimentales.

Ahora bien, las leyes y predicciones (de naturaleza estadística) de la teoría cuántica, de entre las que se destaca el principio de incertidumbre, nos impiden (de hecho, nos prohíben) tener una cercanía mayor y más veraz con la naturaleza de las cosas, por lo que debemos resignarnos a quedarnos sólo con ideas aproximadas de ellas debido a las múltiples imprecisiones propias de nuestra percepción. Físicamente estamos impedidos de ‘ver’ más allá pues perturbaríamos el sistema al intentar depurar la observación, dado que si deseamos ‘ver’ un objeto atómico, éste debe interactuar con un fotón, y debido a que son comparables en dimensiones y requieren energías del mismo orden de magnitud,

---

<sup>73</sup> Heisenberg., *Encuentros y conversaciones con Einstein...* pp. 124-125

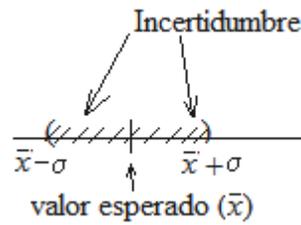
<sup>74</sup> Fernández-Rañada., *op. cit.*, p. 108.

se vuelve imposible llevar a cabo la medida; lo anterior ocurre aún con los dispositivos experimentales más sofisticados, por lo que el principio asegura que siempre desconoceremos cómo es la naturaleza en sí, quedándonos solamente con la interpretación que de ella hagamos y generando modelos, en un primer decir, descriptivos que si bien nos dan una idea de cómo pudieran ser las cosas, nos impide acercarnos a explorar su verdadera naturaleza por lo que, como una consecuencia lógica, jamás podremos conocer su esencia verdadera. Con esto, claramente se establece un fuerte vínculo entre la incertidumbre estadística propia de una medición y la indeterminación epistémica respecto a cuál es la verdadera naturaleza física del objeto atómico, aunque insisto que esto debe ser considerando la visión clásica de las imágenes separadas. No obstante, esta nueva manera de abordar la estadística por parte de la teoría cuántica es novedosa en la física, pues si bien esta rama de la matemática desde siempre ha aparecido ligada a la experimentación, en la física clásica nunca dejó de reconocer con qué clase de objeto trataba; es evidente entonces que hasta en la teoría clásica, y con base en resultados estadísticos, existe una indeterminación asociada a toda medición, puesto que es imposible conocer con exactitud el resultado (de la medición), dejando en claro que lo más que podemos hablar es de precisión. Es decir, la precisión de la medida, por muy elevada que sea, no es más que un intervalo donde se encuentra el valor esperado (de la medida), lo que posibilita que haya un rango de valores donde puede 'caer' el valor medido o calculado de la medición; dicho rango de valores serían las discrepancias que muestran las medidas respecto del valor esperado (vea la figura).<sup>75</sup> Así, tenemos entonces que la medición no cae en un punto, sino en un intervalo que contiene una infinidad de puntos;<sup>76</sup> con esto se ve que no hay un determinismo exacto en la física clásica, sino que más bien se cuenta con un determinismo convencional que es sumamente útil por ser fácilmente manipulable y funcional.

---

<sup>75</sup> Esto nos remite a la definición dada en el pie de página que aparece en la página 34 de este capítulo.

<sup>76</sup> Esto sería el equivalente a la evaluación de nuestras decisiones, es decir, una decisión que tomemos no brinda un único resultado, sino más bien un resultado que cae dentro de un conjunto de resultados posibles, lo que trae aparejado un resultado, digámosle 'azaroso' o 'indeseado', aún cuando queda convencionalmente determinado por estar bien localizado. De este modo podríamos ver la libertad (en general) y su toma de decisiones, pues cada punto del intervalo de decisiones daría uno y sólo un resultado. Nuestra sensación de libertad quedaría explicada de esta manera; y es que cuando tomamos una decisión y evaluamos el resultado, muchas veces no es lo que esperábamos, aunque quede cerca de lo que deseábamos que ocurriera. Evidentemente, al hablar de decisiones, se puede modelar matemáticamente, y se debe considerar un sinnúmero de variables, pues cada una de ellas influye en la función por optimizar. Pero en términos generales, podríamos verlo así como lo planteo.



**Figura 4.2.** Se muestra la incertidumbre y el valor esperado (o exacto).

Pero en el caso cuántico, la incertidumbre estadística se llevó por el lado de que tal incertidumbre conlleva una indecisión respecto a qué entidad del objeto atómico será determinada, es decir, dado que las longitudes de onda de los objetos subatómicos son aproximadamente del orden de magnitud de sus dimensiones, entonces se presenta una incertidumbre asociada a la medición que suele estar muy cerca de la medida. Esto implica que a la hora de efectuar una medición con un instrumento, así sea el más fino, aparecerán perturbaciones que el instrumento de medida causa en el sistema (la función de onda se colapsa), y tales perturbaciones ya no serían despreciables, como ocurre en el caso clásico, lo que motivaría una indeterminación respecto al tipo de objeto que estamos midiendo, es decir, no sabríamos si cuantificamos una onda o una partícula. Sin embargo, esta indeterminación debe ser inexistente y reencauzarse a la estadística convencional de la teoría de errores clásica al asumir al objeto cuántico como un objeto dual. El problema es que no se procedió de esa manera pues se buscó como reconocer qué tipo de entidad –onda o partícula– se cuantifica en un instante dado. Heisenberg se percató de este problema y propone que sería más conveniente renombrar tales entidades, de tal suerte que se tuviese una terminología nueva ambientada a la teoría cuántica.

Así, y cuando estaba decidido a modificar la terminología de la física clásica para adecuarla a la teoría cuántica, y al notar que el carácter explicativo tradicional estaba ausente en ella, Heisenberg se dio a la tarea de restituir, así fuese un poco, la esencia ideográfica propia del modelaje tradicional, decidiendo entonces asumir una postura operativa similar a la que anteriormente adoptara Kelvin, justificando la esencia descriptiva de la teoría con la medición, puesto que

Quando uno puede medir aquello de lo que está hablando y expresarlo en números, sabe algo acerca de ello; pero cuando no puede medirlo, cuando no puede expresarlo en números, su conocimiento es

escaso e insatisfactorio; podrá ser un principio de conocimiento, pero escasamente ha avanzado su conocimiento a la etapa de una ciencia.<sup>77</sup>

Y es que Heisenberg considera que una magnitud tiene trascendencia física siempre y cuando pueda medirse. Y aun cuando su principio limita la medición de las variables canónicas conjugadas en un experimento cuántico, éstas son capaces de suministrarnos información, así sea de naturaleza probabilística, acerca de su proceder. Esto es lo que permite a Heisenberg “ligar” sus ideas sobre la teoría cuántica con la terminología clásica, aun cuando estemos impedidos para visualizar cómo es la realidad física; no obstante, y de alguna manera, es como si viendo la superficie espejo del agua estancada supiésemos que hay un cuenco profundo que la contiene, aunque no podamos cuantificar cuál es esa profundidad. Heisenberg, en este punto, concuerda con el pensamiento de Bohr, cuando éste pronuncia que “There is no quantum world... only an abstract quantum description. It is wrong to think that the task of physics is to find out how nature is. Physics concerns what we can say about nature”.<sup>78</sup>

Y es que Bohr considera que la ciencia no debe preocuparse por cómo es la naturaleza, sino sólo dar descripciones de cómo es su funcionamiento. Esto implica que la física puede adoptar el papel de ser un instrumento que el ser humano utiliza no nada más para predecir la ocurrencia de los sucesos naturales, sino incluso para extender sus órganos sensoriales para ‘ver’ más allá de lo que pueda hacer con sus sentidos limitados por la naturaleza.

Pero creo que si esta propuesta de Bohr tiene validez, entonces no tiene mucho sentido generar una teoría para que funcione sólo como un algoritmo teórico; si bien es admisible recopilar datos y estudiar los eventos sólo con ánimos predictivos, creo que el trasfondo de toda teoría es representar la realidad y permitir hacer inferencias de por qué ocurren las cosas. Esto nos obliga a proponer leyes o teorías que brinden información sustantiva y clara del acontecer natural y que nos puedan conducir a tener una visión holística y armónica de nuestro entorno. Esta visión de la naturaleza debe esclarecer la ocurrencia de las cosas, pero basándose en unos cuantos principios generales y universales, pues de lo contrario, tendremos que estar introduciendo leyes constantemente para ajustarnos a los requerimientos empíricos. Con esto, lo que digo es

---

<sup>77</sup> Tomado de: Baird, D. C. (1991): *Experimentación. Una introducción a la teoría de mediciones y al diseño de experimentos*; Prentice-Hall Hispanoamericana, S. A. México, 1991. p. 8

<sup>78</sup> Kosso., *Appearance and Reality...* p. 152.

que la física no puede, ni debe, resignarse a ser un tipo de fedatario de los milagros naturales y a aspirar ser una cronista fenomenológica. Creo que la ciencia se ve obligada, dada su naturaleza y en tanto que creación humana, a ser curiosa e inquieta, pues es esta curiosidad la que nos lleva a buscar explicaciones, así sean funcionales u operativas (como Heisenberg propone) de la realidad, es decir, de ese mundo natural que se encuentra fuera de nosotros. Esto es lo que hace que observemos y cuestionemos el por qué de los eventos naturales, y debe acicatearnos a buscar las relaciones y causas que originan que el mundo funcione como lo hace.

Bohr, en los inicios de la teoría, justificaba sus respuestas respecto del instrumentalismo teórico de la mecánica cuántica aduciendo que ésta es un instrumento igual que las demás teorías, y que no son ellas, sino nosotros, quienes damos explicación racional a las cosas, lográndose esto porque les dotamos, quizá por consenso, de determinado contenido de verdad y de determinado grado de confiabilidad; es decir, para Bohr somos nosotros quienes verdaderamente deseamos explicar cómo es la naturaleza, aun cuando no digamos cómo es realmente; y esto lo hacemos respondiendo los 'cómo', y no los 'por qué', de la naturaleza.

Pero con el tiempo, la postura instrumentalista de Bohr fue flexibilizándose un poco, al buscar una tesis más significativa intuitivamente, pues parece ser que se dio cuenta de que estaba entrampado con la intencionalidad de la teoría cuántica; de hecho, Kosso objeta el punto de vista de Bohr, al hacer ver que un instrumentalismo tan acentuado suena demasiado utilitario, y para ello, lo hace remarcando la inconsistencia lógica subyacente en dicha postura, al argumentar con toda propiedad que

You need to know a bit about quantum mechanics to fairly interpret sweeping claims about the quantum world. Now that you do, you can. The confusion would be between the two separate claims that Bohr is making in the expanded passage. Perhaps the two are related. Perhaps one is the reason to believe the other. [...] But Bohr is making both a metaphysical claim about the way some aspect of nature *is*, and an epistemological claim about our ability (or inability) to *know* about some aspect of nature. The metaphysical claim is that there is no quantum world. The epistemological claim that we cannot know about the quantum world comes close to being inconsistent with the metaphysics. If the we really cannot know anything about the quantum world, how can we be sure it does not exist? If the epistemic limitations are true, then perhaps a form of quantum agnosticism is more in order than Bohr's professed atheism. [...] Both the metaphysical and epistemological points made by Bohr are prone to extravagant misinterpretation.<sup>79</sup>

O bien:

---

<sup>79</sup> *Ibid.*, p. 152.

The indeterminate quantum properties are made determinate by us in the act of observation, by the physical interaction with our big, classical bodies and machines with the quantum things. Thus, the claim is not that quantum things do not exist; rather it is that their properties (like spin orientation) are not independent of us. This claim is certainly more precise and clearer than saying that the quantum world does not exist. The epistemological point also wants clarification, in particular as to its motivation. What is it about quantum mechanics that should convince us that we cannot know how nature, that is, the quantum world, is? If there is nothing there to know, then of course we cannot know much about it.<sup>80</sup>

Bohr y Heisenberg, están plantados en su postura instrumentalista (si bien el primero es menos radical), conscientes de que están teorizando sobre la inexistencia de observables, y es allí donde reside el problema, pues únicamente pueden establecer relaciones teóricas entre los eventos una vez que ya ocurrieron, y tal ocurrencia es de naturaleza probable. Surge la pregunta de ¿cómo predecir sobre algo que ni siquiera se sabe cuál es su probabilidad de ocurrencia? Podríamos pensar que, al igual que en la teoría clásica, la estadística y la probabilidad nos apoyan, y eso es cierto, sólo que clásicamente la probabilidad determina nuestro grado de ignorancia respecto a la ocurrencia de un evento. Pero en la teoría cuántica esto deja de ser así, puesto que no sabemos en qué momento, ni dónde puede aparecer el objeto atómico, y todo ello porque la interferencia del observador ocasiona que el objeto modifique su función de estado, volviendo imposible la observación directa, cosa que no ocurre en la física clásica. Dicho de otra manera, y según Heisenberg, podemos ubicar el sitio donde podría aparecer el objeto, pero conscientes de que ignoraremos sus características dinámicas; vale decir que el caso inverso también se satisface, según la tesis de Heisenberg.

Pero ¿en términos de qué es la descripción de la teoría cuántica, o a qué se refieren Bohr y Heisenberg cuando hablan de una teoría descriptiva? Obviamente, ambos sabían que la teoría no sólo era una relatora de eventos, sino que más bien podrían haberse referido a que no era una teoría que diera lugar a explicaciones causales, tal como procede la física clásica (aunque también es cierto que no hacen el intento de negar su existencia al referirse a la regularidad estadística); en este sentido tendrían la razón pues al desconocer los nexos causales que aparecen involucrados en la ocurrencia de los eventos, pareciera que éstos suceden azarosamente, aunque así no fuese, es decir, el que no sepamos dónde está el amazonas no implica que no exista; con ello, lo que digo

---

<sup>80</sup> *Ibid.*, p. 153.

es que la probabilidad no excluye la relación causal. Un buen ejemplo de esto lo propone Russell, cuando expone que

En una alberca se encuentran trampolines que permiten a un clavadista lanzarse desde la altura que prefiera. Si los trampolines suben a gran altura, el más alto será elegido solamente por los clavadistas de excepcional excelencia. Si comparamos una temporada de natación con otra, habrá un buen grado de regularidad en la proporción de los clavadistas que eligen los diferentes trampolines; y si hubiera millones de clavadistas podríamos suponer que la regularidad sería mayor. Pero es difícil ver por qué habría de existir esta regularidad si los clavadistas por separado no tienen motivo alguno para su elección. Parecería como si algunos hombres tuvieran que elegir los niveles altos, a fin de conservar números proporcionalmente justos, pero esto ya no sería puro capricho.<sup>81</sup>

Sin embargo, la relación causal de una manera u otra se reinserta en la teoría, aunque sea parcialmente (que es lo que hace la ecuación de Schrödinger y la función de onda) por lo que habría que evaluar con todo detalle cómo están relacionadas y como se modifican las variables de estado bajo observación, aunque para ello requerimos fijar algún referencial espacio-temporal; esto daría razón de las circunstancias y situaciones físicas que afronta el sistema, incluyendo las (éstas sí, probablemente azarosas) condiciones iniciales, y al posibilitar deducciones, diríamos que se trata de una teoría explicativa. De hecho, esto es lo que nos permite inferir los cambios que experimentan tanto el sistema o su entorno, o ambos, simultáneamente; es con las mediciones de uno o ambos lo que nos permite inferir el comportamiento del sistema, aunque es claro que tal inferencia se lleva a cabo basándose en una recolección de datos observables que nos indican qué variable, o qué magnitud, es afectada y cambia sus valores durante o después de la interacción; por ejemplo, en la colisión de dos autos, vemos 'directamente' (en un sentido mensurable) como se alteró la longitud o anchura, o como se deformó su parte frontal, etc. Lo mismo ocurre en otros ámbitos de la física, aunque requiramos introducir otros elementos para conocer qué estado guarda el sistema. Por ejemplo, a nivel molecular, podemos establecer, *grosso modo*, la misma consideración que con los autos, aunque se requieren otras estrategias teórico-experimentales para determinar tanto la interacción del sistema como las magnitudes que han cambiado.

En el caso de la teoría cuántica, el hecho de desarrollarse a partir de inobservables le ha obligado a introducir un elemento donde se asiente la información del sistema: ese elemento teórico es la función de onda  $\Psi$ , que no es más que una función de densidad probabilista que transfiere la información del sistema, inclusive la posicional y temporal; es

---

<sup>81</sup> Russell, B. (1935): *Religión y Ciencia*; Fondo de Cultura Económica. México. 1973. p. 111.

dicha función (de onda) la que suministra la descripción del estado que guarda el sistema en todo instante, y lo hace en términos que son mensurables (u observables), aunque éstos no tengan valores bien definidos, al provenir de la recolección de datos estadísticos.

Por si fuera poco, en el ámbito microscópico no tenemos un instrumento con qué medir los cambios que sufren las variables, y ya no tenemos (ni nos sería útil) un instrumental más fino. Esto propicia que, al desconocer las características esenciales del sistema y su comportamiento, únicamente podamos imaginar cómo es –y no tan adecuadamente como lo hacemos en la teoría clásica– haciéndolo mediante suposiciones y/o predicciones respecto del estado del sistema cuántico (que llevamos a cabo indirectamente) pues la teoría nos dice que en caso de querer realizar una medición con algún instrumento por más fino que sea, el instrumental comenzará a interactuar con el objeto cuántico, causando la modificación de sus variables (bien sean las geométricas o las dinámicas), tal y como lo plantea el principio de complementariedad de Bohr (PCB). Respecto a esto, de Broglie asegura que

En los trabajos anteriores de Bohr, la noción de “complementariedad” que él introducía era opuesta a la noción de “causalidad”. Bohr decía que la causalidad no tenía lugar dentro de la física cuántica. Sin embargo, dicha afirmación no tenía un significado muy preciso. Para precisarla, era necesario definir en primer término lo que se entiende por causalidad, ya que esta palabra se emplea en dos o más sentidos diferentes. Por lo tanto, vamos a tratar de precisar las nociones correspondientes.

Se podría conservar el término de *causalidad* para la relación existente entre la causa y el efecto. La tesis de que la causa debe preceder al efecto no puede ser puesta en duda y, en ese sentido, tiene numerosas aplicaciones, particularmente en la teoría cuántica. Esta tesis se encuentra conectada con la definición del pasado y del futuro; definición que es precisada justamente en la teoría relativista del espacio-tiempo. Por consiguiente, no cabe duda de que la noción de causalidad –en el sentido que acabamos de precisar– sigue siendo aplicable en la física cuántica.<sup>82</sup>

Sin embargo, con la interacción entre el objeto y el instrumento de medición, y dado que ignoramos qué clase de entidad clásica es (el objeto) en ese momento, entonces no podremos determinar con toda propiedad la evolución que seguirá el sistema, es decir, se ha indeterminado; es así que

Quantum systems, we know, can exist in superposition states. Furthermore, some pairs of properties, like horizontal spin orientation and vertical spin orientation, or position and momentum, are inherently incompatible. It is not just that they cannot be measured at the same time. They cannot exist at the same time. The wave/particle duality of quantum systems, the complementarity of position and momentum and the Heisenberg uncertainty principle, are results of the experiments and principles of quantum mechanics, not of the properties of our participation in observing a quantum system. These are descriptions of the system itself, not of our interaction with the system. But, since these properties

---

<sup>82</sup> de Broglie. *Examen de la mecánica...* pp. S<sub>29</sub>– 252-253.

of the quantum system never show up on classical measuring devices, the quantum system cannot be directly observed. None of the distinctively quantum mechanical features of the world are amenable to direct observation. The world never appears to us in a quantum state. While quantum mechanics describes things in terms of indeterminateness, superposition, and complementary properties, these things never appear. [...] And yet, if we agree that observations are classical and that quantum things can be in superposition states, it seems that for some reason the act of observing these things knocks the superposition right out of them. The act of observing changes the quantum system into a classical system. So anytime you look, you see classical properties. How then can observations, which are always classical, be evidence of a quantum reality?<sup>83</sup>

Es a esto a lo que se refieren Bohr y Heisenberg con los inobservables (principal señalamiento de Heisenberg) y la postulación de sus principios, aunque después suavicen su discurso intentando volver más intuitiva la naturaleza de los objetos cuánticos y pretendiendo con ello retomar la descripción clásica como un apoyo adicional (en el sentido ideográfico) del formalismo cuántico. A este respecto, de Broglie profiere que

[...] En sus trabajos anteriores, Bohr utilizaba con frecuencia la expresión “interacción incontrolable”. Esta expresión la empleaba para referirse a la relación entre el aparato de medición y el objeto atómico, y también para explicar el origen de las relaciones de incertidumbre de Heisenberg. El empleo de esa expresión respondía al propósito de explicar las relaciones de incertidumbre, manteniéndose conceptualmente en el dominio clásico; tarea que nos parece completamente irrealizable.<sup>84</sup>

Más aún, Bohr, que inicialmente se rebeló contra el dogmatismo que rige la física clásica, termina por mostrarse ambivalente respecto al marco conceptual de ésta al decir, por un lado, que los conceptos clásicos son inútiles para explicar los fenómenos atómicos, y por la otra, al hacer uso de ellos, admitiendo que son dichos conceptos quienes nos han dotado –a fuer de su estudio y por la manera en que se han desarrollado– de visualizaciones ideográficas claras; así, concluye diciendo que: “No obstante que los fenómenos trasciendan el alcance de la explicación de la física clásica, la explicación de todos los testimonios tiene que ser expresada en términos clásicos”.<sup>85</sup>

En el capítulo siguiente abordaremos con más detalle esta cuestión.

---

<sup>83</sup> Kosso., *op. cit.*, pp. 158-159.

<sup>84</sup> de Broglie...*Examen de la mecánica...* pp. S<sub>29</sub>– 252-253.

<sup>85</sup> Niels Bohr, *Phys. Rev.*, Vol. 48, 1935, p. 696.

## 4.6 Conclusiones

Hemos visto, al recorrer este capítulo, como la teoría cuántica antigua, a pesar de sus numerosos éxitos produjo un dejo de desesperanza en los científicos que buscaban explicar el acontecer subatómico, pues se encontraron con una teoría poco clara conceptualmente y altamente matematizada. Esta insatisfacción se trocó en júbilo al aparecer en escena la ecuación de Schrödinger, que buscaba restituir la claridad intuitiva y conceptual en la nascente teoría. Esta ecuación, que buscó explicar el acontecer subatómico en términos del movimiento ondulatorio generó altas expectativas de que por fin se había alcanzado una física explicativa y determinista para el submundo cuántico, análoga a la física clásica. Si bien es verdad que tal ecuación no se obtiene de evidencias experimentales y está limitada en cuanto a su aplicabilidad experimental, vino a solucionar muchos problemas asociados a los objetos atómicos, utilizando la idea de las ondas.

Buscando cómo solucionar los problemas que se le presentaban, la teoría ondulatoria introdujo el concepto de la función de onda, una función probabilística que relaciona la naturaleza corpuscular de la materia con la naturaleza ondulatoria. Esto ocasionó que se superpusieran dos imágenes clásicas en una sola entidad física, tal como antes lo hiciera la radiación electromagnética. Sin embargo, esta conjunción en una sola criatura cuántica de conceptos tradicionalmente disjuntos se ha vuelto un problema epistémico profundo según la perspectiva de la visión clásica.

Para subsanar tal problemática, tanto Bohr como Heisenberg y Born, entre otros, postularon la naturaleza dual de los objetos atómicos, conviniendo que dichos objetos gozan de atributos duales porque esa es su naturaleza. Esto queda asentado tanto en la función de onda como en el Principio de Complementariedad de Bohr, que es donde se axiomatiza que los objetos atómicos poseen atributos corpusculares y ondulatorios simultáneamente, y depende del experimento al que se vea sometido el objeto atómico para que privilegie una naturaleza sobre la otra. Por su parte, el Principio de Indeterminación de Heisenberg prohíbe que se pueda efectuar medición alguna al objeto para determinar qué tipo de naturaleza tiene, pues intentar medir con algún instrumento, por muy fino que sea, ocasionará que el objeto modifique su estructura física, dejándonos con la duda de la naturaleza real del objeto; esto se conoce como el colapso de la función de onda, y se refiere a que siempre que intentamos efectuar una medición al objeto, éste modifica su naturaleza. En este caso, la incertidumbre estadística que promueve dicho principio conlleva, efectivamente, una indeterminación de tipo epistémico. Esta

indeterminación es, bajo la luz de la teoría, irresoluble puesto que las dimensiones de los objetos atómicos son comparables con las longitudes de onda de la radiación requerida para efectuar una medición en objetos de semejante tamaño. Es decir, el principio de indeterminación es una frontera teórico-experimental infranqueable que se erige entre los mundos subatómico y macroscópico.

Ahora bien, subsiste la interrogante de por qué no modificar el lenguaje teórico de la física cuántica. Como hemos visto, para los jóvenes físicos no representaba mayor problema modificar los conceptos físicos de la teoría clásica pues, a fin de cuentas, consideraban que la matemática es la herramienta suficiente para explorar cómo es la realidad, pues la matematización es el puente entre el evento y sus resultados, haciendo –aparentemente– inútil la representación visual o ideográfica. Pero esto conlleva el riesgo de que la teoría se vuelva sólo el equivalente a una computadora personal que brinda resultados algorítmicamente, es decir, que la teoría sólo sea un instrumento de realizar cálculos; pero... hay que interpretar los susodichos (resultados) y esto se logra bajo la luz de una teoría; es decir, una teoría debe llevar, necesariamente, la intencionalidad de explicar la realidad, lo que apunta a que una teoría debe ser, en esencia, explicativa. Esto fue lo que motivó a Bohr a enmendar el camino y retomar los conceptos de la física clásica, por ser ellos quienes nos brindan seguridad conceptual y una elevada dosis de intuitividad. Por eso rechaza hacer a un lado el lenguaje clásico que aplica en la teoría cuántica, aunque no se haya podido solucionar hasta hoy si es una teoría instrumentalista o no.

Por mi parte, creo que la teoría, tal como lo he propuesto, es una teoría que si bien no es totalmente explicativa, no es tampoco totalmente instrumentalista pues alude a la realidad y contempla entes reales,<sup>86</sup> además de que goza de atributos propios de una teoría explicativa, dado que permite hacer inferencias a partir de hechos anteriores, así sea probabilísticamente. Soy de la idea de que la probabilidad no excluye la causalidad, aun cuando podamos pensar que la debilita; y es que la probabilidad debe estar fincada en la estabilidad del sistema, y eso es un concepto de índole causalista. Asimismo, hay que aclarar que la teoría busca explicar la realidad, y lo hace basándose en la matematización de los eventos, igual que lo hace la física clásica. En este sentido,

---

<sup>86</sup> Cuando menos, sabemos que las partículas elementales son reales, pues podemos verificar fácilmente la existencia de los electrones, los protones y los neutrones. Los eventos de difracción de tales objetos lo testifican; además, otro gran testimonio de su realidad son la electrónica y algunos fenómenos electromagnéticos, entre ellos, la corriente eléctrica.

podemos suponer que la física cuántica establece, igual que lo hacen la física clásica y la teoría de la relatividad, una relación uno a uno entre el evento real y su representación matemática porque considera que la realidad es un ente con atributos matematizables. En este sentido, la teoría cuántica sería semi-explicativa, faltándole únicamente incorporar imágenes visuales o ideográficas de cómo pueden ser los objetos atómicos y una relación causalmente deductiva que permita inferir una mayor cantidad de resultados a partir de pocos axiomas, para llegar a ser totalmente explicativa.

Aún así, podemos decir que la teoría cuántica es un campo de estudios que levanta –y probablemente seguirá haciéndolo– controversias debido a sus múltiples facetas que nos conducen a replantearnos cómo es el mundo externo, y por qué es así; sin duda alguna, las inquietudes y pasiones que despierta la mecánica cuántica y que nos impelen a hurgar en la naturaleza buscando sus más preciados secretos es uno de los mayores frutos que ha producido a lo largo de su historia. Lo que Nagel expresa de la ciencia puede decirse de la mecánica cuántica, ya que:

“[...] la ciencia ha dado frutos variados [...] También es responsable de muchas otras cosas que en la actualidad no atraen la atención pública, pero algunas de las cuales han sido y continúan siendo valoradas, con frecuencia, como los frutos más preciosos de la empresa científica”.<sup>87</sup>

---

<sup>87</sup> Nagel., *op. cit.*, p. 11.

## Capítulo 5

### PIH: ¿Indeterminación o Incertidumbre?

#### Introducción

En los capítulos precedentes hemos apreciado los cambios que la física experimentó con la aparición de la mecánica cuántica, pues fue una teoría novedosa que puso en evidencia la inutilidad no nada más explicativa, sino predictiva, de la física clásica ante los experimentos relacionados con los objetos atómicos. Y es que la física clásica, con todo su bagaje teórico y su modelación matemática altamente efectiva en el mundo macroscópico se encontró atada de manos para describir y/o explicar el acontecer cuántico. Es aquí donde hace acto de presencia la teoría cuántica, cimbrando los pilares que sirven de sustento al edificio teórico clásico: el determinismo, la continuidad, la objetividad, y la capacidad deductiva, requisitos considerados indispensables para lo que admitimos es una teoría explicativa.

Se admite que la teoría cuántica incumple tales requisitos, por lo que automáticamente pierde la potencial virtud de explicar el discurrir natural. Este inevitable déficit explicativo de la teoría se debe, en buena medida y como primer caso digno de estudio, a que no se ha podido encontrar una justificación –ya no digamos teórica, sino conceptual o al menos, intuitiva– suficiente que solucione el problema central de la teoría: el dilema dual corpúsculo–onda que se desprende de las evidencias empíricas al tratar con los objetos atómicos. Esta conjunción de conceptos clásicos esencialmente disjuntos influyó para que la probabilidad y la estadística se volvieran elementos teóricos no sólo válidos, sino también necesarios, en la incierta predicción de resultados.

La certeza entonces pierde vigencia ante el avasallador empuje de lo indeterminado. Y es que la fusión contradictoria de imágenes, aunada a la imposibilidad de determinar o medir con precisión qué clase de entidades estamos observando, es lo que conduce a la postulación de dos principios esenciales que impulsan el desarrollo ulterior de la teoría: los Principios de incertidumbre de Heisenberg y el de Complementariedad de Bohr, principios que se entrelazan y se necesitan uno al otro para soportar casi el peso total de la teoría en lo que respecta al formalismo matemático, lógico, físico y filosófico. En este

capítulo se hace un examen más cuidadoso de como se vinculan esto dos principios y las consecuencias que tienen en el desarrollo de la teoría.

## 5.1 El Principio de Incertidumbre de Heisenberg

El Principio de Incertidumbre de Heisenberg (PIH) no sólo es uno de los pilares fundamentales de la Mecánica Cuántica (MC) sino que también ha resultado ser, hasta el día de hoy, el más persistente nudo gordiano que nos impide adentrarnos en las profundidades del mundo subatómico. Dicho postulado “llamado injustamente principio de incertidumbre; injustamente porque no es un principio, es decir, una relación escrita *a priori*, sino al contrario, un teorema matemático deducido siguiendo las reglas de una lógica sumamente rigurosa”<sup>1</sup> postula la imposibilidad de efectuar mediciones precisas y simultáneas de las variables físicas requeridas para describir, de manera detallada, el acontecer de los fenómenos subatómicos, conduciéndonos a cuestionar el conocimiento que poseemos del mundo natural.

Efectivamente, PIH es un corolario<sup>2</sup> derivado de la mecánica ondulatoria de Schrödinger que restringe la descripción de la naturaleza subatómica al instituir que no es posible establecer, simultáneamente y con precisión arbitraria, un vínculo entre pares de variables dinámicas conjugadas que posibiliten la determinación completa del estado de movimiento de un sistema, por ejemplo: posición y cantidad de movimiento lineal, energía y tiempo, posición angular y cantidad de movimiento angular, etc.

En capítulos previos expresamos PIH de manera particular, pero en términos generales, PIH se expresa como<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Marmasse., *La paciente...* p. 149.

<sup>2</sup> Matemáticamente, puede decirse que el principio de incertidumbre postula que una función no puede converger simultáneamente con su transformada de Fourier, por lo que puede escribirse como  $\frac{1}{2\pi} \|f\|_2^2 \leq \|xf\|_2^2 + \|\omega f\|_2^2$ , donde la transformada de Fourier normalizada está dada por  $Ff(\omega) = \hat{f}(\omega) = \int_{\mathbb{R}^d} f(x) e^{-2\pi i x \cdot \omega} dx$ . Las cantidades del lado derecho de la igualdad se relacionan con las incertidumbres de la posición y la cantidad de movimiento. Los subíndices se refieren al espacio  $L_p$  que se maneja;  $f$  y  $\hat{f}$  son funciones que representan la posición y la cantidad de movimiento. El principio de incertidumbre así expresado representa el significado físico más pequeño para una celda con volumen unitario del espacio fase  $\mathbb{R}^d \times \mathbb{R}^d$ . Para más detalles, puede consultarse el excelente artículo de: Gröchenig, K.; *An Uncertainty Principle related to the Poisson summation formula*; Studia Mathematica 121 (1). ICM. 1996.

<sup>3</sup> La deducción de este principio aparece en:

- Matthews., *Introduction to Quantum Mechanics...* pp. 25-29, y
- Powell, J. L. & Craseman, B.: *Quantum Mechanics*; Addison-Wesley, Reading, USA, 1961. pp. 182-184.

$$\Delta q \Delta p \geq \hbar \text{ ----- (1)}$$

donde:  $\hbar = h/2\pi$ ,

$q$  y  $p$  variables dinámicas conjugadas o complementarias;  $q$  es la variable dinámica o cinética y  $p$  es la variable cinemática o geométrica.<sup>4</sup>

y:  $\Delta q, \Delta p :=$  incertidumbre de  $q$  y  $p$ , respectivamente.

Como se mencionó antes, para casos particulares, PIH podría reescribirse de acuerdo a las variables utilizadas en el experimento –cantidades cinemáticas y cinéticas–, tales como:

$$\begin{cases} \Delta p_x \Delta x \geq \hbar \\ \Delta E \Delta t \geq \hbar \\ \Delta \omega \Delta t \geq \hbar \end{cases} \text{ ----- (2)}$$

etc.

Este principio apareció en 1927 e inmediatamente se constituyó en uno de los postulados fundamentales de la mecánica cuántica, y de manera conjunta con el Principio de Complementariedad de Bohr (PCB), impuso una restricción teórica insalvable al impedir la adquisición de un conocimiento más profundo del universo subatómico pues al pretender medir ambas variables de la ecuación (1) simultáneamente –en alguna de sus modalidades, tal y como aparecen en la ecuación (2)–, pueden ocasionarse grandes variaciones en ellas (v. g.: energía, cantidad de movimiento, etc.) durante el proceso de observación debido a la interacción entre el objeto a medir y el instrumento de medición.

La interpretación estadística que Born daba a la colisión entre partículas elementales, y la propuesta de Pauli respecto a que la función de onda (considerada) como un continuo no explicaba satisfactoriamente que el electrón se hallase en las vecindades de un punto,

---

<sup>4</sup> Son las variables que aparecen en la mecánica galileana o cinemática y en la mecánica newtoniana . Dado que la cinemática “estudia el movimiento de los cuerpos sin atender las causas (fuerzas) que lo producen, basándose en métodos puramente geométricos,” a sus variables suelen denominárseles también “variables cinemáticas o geométricas”; ejemplo de ellas serían: posición, desplazamiento, velocidad, etc. Por su parte, la mecánica newtoniana emplea cantidades dinámicas –pues varían con el tiempo, aunque obedecen leyes o principios de conservación–: cantidad de movimiento lineal y angular, energía, fuerza, etc. A veces se hace esta discriminación pues en la mecánica cuántica las variables dinámicas son aquellas magnitudes físicas susceptibles de ser medidas u observadas (los observables), tales como: masa, posición, velocidad, momentos lineal y angular, energía, etc. Es menester aclarar que el tiempo no se considera un observable.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

a menos que se manejase como una distribución probabilista;<sup>5</sup> esto fue lo que llevó a admitir la discontinuidad de  $\Psi$  y, al mismo tiempo, impulsó a Heisenberg a proponer su principio. Fernández-Rañada lo expresa con toda claridad al exponer:

Reconsiderando un ejemplo estudiado por Bohr, dos electrones que colisionan cada uno con su posición  $q$  y su momento  $p$ , resulta que mientras están lejos se portan de modo clásico y no viendo Pauli ninguna dificultad en ello, pero cuando se acercan o chocan aparece “un punto oscuro” que resume diciendo “las  $p$ 's pueden controlarse, pero las  $q$ 's quedan incontroladas. Esto implica que, al calcular la probabilidad de un cambio en las  $p$ 's para unos valores dados, es preciso promediar sobre todos los valores posibles de las  $q$ 's”.<sup>6</sup>

De lo expresado por el autor citado es fácil ver que los supuestos de Pauli son casi exactamente lo que propuso Heisenberg en la ecuación (1), faltándole únicamente (a Pauli) ligarlos con el cuanto de acción  $h$ , pues es precisamente esta constante el límite inferior natural al que se puede llegar; de hecho, es  $h$  quien rompe la continuidad característica existente en la física clásica, y de paso, imposibilita proseguir con la divisibilidad de la materia hasta acercarnos a cero mediante el concepto de límite, tal y como se hace clásicamente.

Y es que Heisenberg, al estar trabajando con la mecánica matricial encontró natural dar una descripción matemática para ilustrar la naturaleza discreta de la materia en forma de matrices,<sup>7</sup> descripción que Dirac mostró después que se complementaba con la representación ondulatoria y continua expresada por la ecuación de Schrödinger.<sup>8</sup> Así que después de conocer los trabajos de Born y de Pauli, Heisenberg postula su famoso principio, que de manera general se expresa como aparece en la ecuación (1), y en él expone con toda naturalidad, y de manera implícita, que el azar subyace en el mundo cuántico (y natural) y se hace presente debido a los instrumentos de medida; Heisenberg

---

<sup>5</sup> Recordemos que  $|\Psi|^2 dq$  representa la probabilidad de encontrar un electrón en un estado estacionario del átomo con coordenadas entre  $q$  y  $q + dq$ .

<sup>6</sup> Fernández-Rañada., *Ciencia, incertidumbre y conciencia...* p. 112.

<sup>7</sup> Heisenberg's stroke of genius was finding his matrices, and it was itself a founding theoretical move. That is, this arrangement of the relationships between observable quantities in infinite matrices of complex numbers (never observable as such) is already theory, not observation of nature, which does not arrange anything in this way. It is nearly a miracle that Heisenberg proceeded to arranging or, as against the classical view, rearranging the available data into his matrices, infinite square tables of complex-number quantities related to these data. (These matrices must be infinite in this case, for example, in order to derive the uncertainty relations.) He was, famously, not even aware at the time that the corresponding mathematical theories (matrix algebra) already existed at the time, which was realized by Born, his teacher, upon reading the paper. Heisenberg reinvented matrix algebra [...] (Plotnitsky, A. (2006): *Reading Bohr: Physics and Philosophy*; Fundamental Theories of Physics; Springer. USA (2006). pdf. p. 24

<sup>8</sup> Cfr. Capítulo 3.

endosa, en primera instancia, la “incerteza”, incertidumbre o error al proceso de medición, y al hacerlo, señala también que la “indeterminación natural” es imposible de soslayar, por lo que es más conveniente suplantar la visión de un universo determinista (del tipo laplaciano) por un universo de carácter estadístico-probabilista; esto lo refiere claramente al decir que

In 1924 Bohr, Kramers and Slater [...] introduced the hypothesis that the waves are of the nature of probability waves: that they represent not a reality in the classical sense, but rather the “possibility” of such reality. The hypothesis was that the waves defined the probability, at every point, that an atom present there is emitting or absorbing radiation [...] It seemed to follow from this that the law of conservation of energy cannot be maintained in the individual processes, and Bohr, Kramers and Slater assumed that it holds only for the statistical average [...] This probability as a new kind of “objective” physical reality.<sup>9</sup>

Y también:

En la primavera de 1927 nacieron luego las relaciones de incertidumbre, que tendían definitivamente el puente a la interpretación estadística de la teoría cuántica. [...] Dichas relaciones vienen a decir que dos determinantes de un sistema –cuyo conocimiento simultáneo es necesario en la física clásica para determinar completamente el sistema– no pueden ser conocidas, en la teoría cuántica, con precisión absoluta al mismo tiempo, o lo que es lo mismo, que entre las incertidumbres o imprecisiones de esas magnitudes existen relaciones matemáticas que impiden el conocimiento exacto de ambas a la vez.<sup>10</sup>

PIH, al derivarse de un desarrollo estadístico-probabilista, señala tajantemente la imposibilidad de llevar a cabo cuantificaciones de manera simultánea de las variables complementarias, geométricas y dinámicas,<sup>11</sup> asegurando no sólo la imposibilidad de alcanzar un conocimiento pleno y perfectamente determinado del comportamiento y de la trayectoria que siguen los objetos atómicos, sino también un conocimiento objetivo en el sentido tradicional, pues éste es sustituido por una objetividad probabilística; pero ello contraviene el supuesto clásico de la predicción certera donde es posible conocer con todo detalle el estado subsecuente de un sistema toda vez que se ha determinado el

---

<sup>9</sup> Heisenberg, W. (1955): *The development of the interpretation of the quantum theory*; en: *Niels Bohr and the development of physics. Essays dedicated to Niels Bohr on the occasion of his seventieth birthday*. (Edited by W. Pauli); Pergamon Press Ltd., London, 1955. pp. 19-20.

<sup>10</sup> Heisenberg., *Encuentros y conversaciones con Einstein...* 124-125

<sup>11</sup> Si recordamos, desde los albores de la humanidad, el espacio y la duración de un evento (el tiempo) han sido requisitos indispensables para dar la descripción –y posteriormente, la explicación– del acontecer natural. Tales conceptos –y su respectiva variabilidad, dependiendo de cada estudio– sólo se definen operativamente. De hecho, me parece que hay algún físico o filósofo que asegura que tanto el espacio como el tiempo son manifestaciones de nuestra experiencia (cito de memoria). Así que no es extraño que tales conceptos, vueltos variables, sean requeridos por la teoría cuántica, al ser cantidades físicas descriptivas del acontecer natural.

estado que guardaba (el sistema) en un instante previo,<sup>12</sup> además de que también echa por tierra la consideración habitual de la existencia independiente y distinguible de los objetos físicos y del observador, tal como se verá posteriormente.

Pero lo anterior no aparece de la nada, pues para empezar, uno de los problemas más graves que afronta la teoría cuántica es el de realizar predicciones a partir de mediciones obtenidas de eventos que ya ocurrieron. Esto, si bien guarda cierta similitud con lo que se hace en la teoría clásica, en la teoría cuántica es más problemático pues la interacción entre el objeto a medir y el instrumento de medición es altamente fluctuante, cosa que no aparece tan marcada en el caso clásico. En la física tradicional la interacción del instrumento de medida y el sistema por medir es despreciable, y en caso de que no deseemos ignorar tal interacción, podemos considerarla, a la hora de evaluar los resultados experimentales, casi como el equivalente a un error sistemático que influye de la misma manera a lo largo del proceso de medición, por lo que no afecta en lo más mínimo. Pero en la teoría cuántica esto ya no se puede pasar por alto, pues el proceso de medición está fuertemente ligado con las variables dinámicas, afectándolas inevitablemente.<sup>13</sup>

De acuerdo a lo que muestran las evidencias experimentales, la trayectoria de una entidad cuántica no se manifiesta como un continuo, pues aparecen “saltos”<sup>14</sup> cada vez que se desea conocer una de las variables involucradas en el experimento, imposibilitando con ello que adquiramos un mayor conocimiento del estado que guarda el sistema; de hecho, este es el *quid* del problema; y hay más todavía, pues aun manteniendo constante el valor de la medida, encontramos fluctuaciones notorias en cada lectura recabada, sea que queramos determinar las variables geométricas o las variables cinéticas del objeto atómico. Esto nos hace cuestionar si el concepto de velocidad concuerda en los ámbitos clásico y cuántico. En el primer caso, definimos la velocidad como el cambio en la posición del cuerpo conforme transcurre el tiempo,<sup>15</sup> donde las coordenadas espaciales dadas por el vector de posición ( $\vec{r}$ ) están perfectamente definidas bajo la elección de un referencial espacial arbitrario, y donde el vector posicional

---

<sup>12</sup> Recordemos que la mecánica hamiltoniana considera la descripción de un sistema en términos de variables dinámicas del mismo tipo, tales como la posición y el momento lineal. Es por eso que aparecen en el PIH.

<sup>13</sup> Podemos pensar en cómo medimos la velocidad de un auto, o la velocidad de una pelota de béisbol, por ejemplo; en estos casos, siempre ignoramos el comportamiento del propio instrumento de medición. Inclusive, en la medición de la corriente eléctrica, frecuentemente hacemos a un lado las características propias del amperímetro a tal grado que omitimos el propio error del instrumento.

<sup>14</sup> El salto cuántico. Para mayor referencia, ver § 4.2.

<sup>15</sup> Haciendo que el intervalo temporal sea cada vez más pequeño, es decir, se toma el límite.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

puede ser medido en todo tiempo, pues la trayectoria seguida por el sistema, al ser continua y estar bien definida, puede ‘rastreadse’ completamente.

Pero en el caso cuántico las evidencias experimentales indican que el proceso debe ser llevado a cabo de manera distinta porque la trayectoria ya es inexistente, notándose que es innecesario fijar las coordenadas espaciales del objeto con la intención de efectuar una medida dinámica, pues no es posible encontrar ninguna velocidad determinada del objeto; si por el contrario, se mantiene una velocidad constante del objeto, entonces se observa que las mediciones de la posición muestran que ésta es completamente indeterminada; es precisamente esta ausencia de una trayectoria bien definida lo que imposibilita la descripción clásica completa del sistema cuántico en todo tiempo. El caso experimental anterior, de los más simples de llevar a cabo, muestra que cuánticamente es imposible alcanzar la anhelada descripción clásica del sistema (completa y detallada) por no poder medirse simultáneamente las variables necesarias para dicha descripción, lo que hace que la predicción certera de la evolución de un evento atómico sea poco menos que imposible. Esta discontinuidad en la trayectoria debe sobrevenir, conjeturo, del proceso de medición y la manera en que afecta el comportamiento del objeto; y es que es viable suponer que antes de la medición el sistema cuántico se encuentra en un estado de equilibrio dinámico, por lo que el sistema es estable y no se observa nada anormal; sin embargo, al pretender medir, el sistema es perturbado por el dispositivo de medida, sobreviniendo una inestabilidad debido a la interacción objeto atómico-instrumento de medida, lo que trae consigo la alteración del estado de equilibrio, y por supuesto, el salto en la lectura, lo que se traduce en discontinuidades de la trayectoria y con ello, se impide su representación matemática funcional, que es quien permite determinar el comportamiento del sistema, tal y como ocurre en la teoría clásica.<sup>16</sup>

Esta imposibilidad física de observar –así sea indirectamente, vía medición de la trayectoria– el comportamiento de una entidad subatómica incide directamente en la conceptualización que podamos hacer de ella; esta conceptualización ordinaria de la teoría clásica es quien permite la representación ideográfica y quien facilita las deducciones (certeras) del comportamiento del sistema bajo estudio. Sobra decir que en el caso cuántico esta carencia de representaciones ideográficas se erige como un gran impedimento para alcanzar, así sea intuitivamente, una explicación clara del submundo atómico. Esto es la causa de que los modelos pictóricos habituales de la física clásica

---

<sup>16</sup> Cfr. Capítulo 2.

sean suplantados por el modelaje matemático en la física cuántica, y es dicho modelaje quien avala la sustitución del 'pictoricismo', puesto que permite 'entrever' –quizá como una especie de 'latido' o intuición–, describir y predecir los eventos.

No obstante, y pesar de sus insuficiencias o carencias representativas, tanto la teoría cuántica como PIH esgrimen triunfantes sus logros predictivos en los que resalta el gran paralelismo entre los datos teóricos y los datos experimentales, mostrándose seguros de que el modelaje matemático hace innecesario recurrir a las representaciones pictóricas tradicionales, y a pesar de que no es posible dar una explicación tradicional de por qué ocurren los fenómenos, la herramienta matemática y su correspondencia biunívoca con el experimento son suficientes para describir los fenómenos cuánticos. Así lo refiere Heisenberg al hablar de la complementariedad y de PIH, pues

[...] At this time Bohr developed the foundations of his idea of “complementarity”, while I tried to solve the problem of how to pass from an experimentally given situation to its mathematical representation, by inverting the question, that is, by the hypothesis that only those states which can be represented as vectors in Hilbert space can occur in nature or be realized experimentally. This method of solution, concerning which I had an exhaustive correspondence with Pauli at the time, had its prototype in Einstein’s special theory of relativity. Einstein had removed the difficulties of electrodynamics by saying that the “apparent” time of the Lorentz transformation was the real time; he had assumed that Nature is such that the real time always corresponds to the letter  $t'$  in the Lorentz transformation. Similarly, it was now assumed in quantum mechanics that real states can always be represented as vectors in Hilbert space (or as “mixtures” of such vectors). The uncertainty principle was the simple expression for this assumption.<sup>17</sup>

PIH, tal y como se mencionó antes, inhabilita el conocimiento simultáneo de las variables conjugadas,<sup>18</sup> y se convierte con ello en uno de los grandes detractores del determinismo filosófico inserto en la física al referir que sólo es posible conocer, y de manera probable, el estado que guarda un sistema cuántico al tiempo  $t$ , donde  $t > t_0$ ,

<sup>17</sup> Heisenberg., *The development of the interpretation...* p. 21

<sup>18</sup> Heisenberg was first [...] characteristic of his intellectual temperament, by introducing his “new kinematics,” introduced in his first paper on quantum mechanics and developed by him and others in a full-fledged quantum Chicago lectures, *The Physical Principles of the Quantum Theory* (Heisenberg 1930). Traditionally, as the term “kinematics” indicates, it refers to a representation, usually by means of continuous functions, of the attributes of motion, such as positions (coordinates) or time, or velocities of a body. The representation of dynamic properties, such as momentum and energy, are dependent on and are functions of kinematical properties, but Heisenberg’s “new kinematics” referred its mathematical elements to what is observable in measuring instruments under the impact of quantum objects, rather than represented the attributes of these objects themselves. In addition, these elements were no longer functions, but infinite-dimensional square tables or matrices of complex variables with no classical-like, nor ultimately any relation, to the attributes of motion of quantum objects, but related only to the impact of the latter upon measuring instruments. These relations were established by means of certain, *ad hoc*, mathematical rules through which one could generate certain sets of real and indeed whole numbers (quantum numbers), corresponding to the results of the measurements in question [...] (Plotnitsky., *Reading Bohr...* p. 21)

debilitando con ello (que no negándolo) el eslabonamiento causal entre estados contiguos del sistema. Así, PIH permite, y garantiza, la existencia del azar en la teoría.

Pero al admitir como válido el principio de indeterminación (con su inherente carácter probabilista) también se ve lastimado seriamente el objetivismo de la física clásica que, al pretender trasladarse a la mecánica cuántica, no sólo no logra mantener incólume la separabilidad y unicidad de las imágenes tradicionales onda y partícula, sino que también se ve debilitado por el comportamiento fluctuante y estadístico de los datos vinculado al proceso de observación, pues tal y como Heisenberg pregona:

El estado de un sistema, en la mecánica cuántica, puede caracterizarse por un vector en un espacio multidimensional, y este vector implica enunciados acerca del comportamiento estadístico del sistema en determinadas condiciones de observación. La descripción objetiva del sistema, en el sentido tradicional, es imposible.<sup>19</sup>

Pero hay que decir que el objetivismo clásico se derrumba no por el hecho de usar la probabilidad y estadística subyacentes en PIH, sino por la interpretación que de aquéllas se hace. La probabilidad y estadística ya habían aparecido en la física clásica en distintas áreas; baste recordar que para Boltzmann la probabilidad y estadística jugaban un papel secundario en la mecánica estadística donde se utilizaron como una manera de representar el grado de ignorancia que tenemos de un sistema con una cantidad incontable de moléculas, es decir, Boltzmann consideraba que los movimientos moleculares individuales eran igualmente determinables y las colisiones totalmente equiprobables; lo mismo ocurría con Planck y con Einstein en lo referente al manejo estadístico que siguieron en sus respectivos desarrollos teóricos.<sup>20</sup> En estos casos, se consideraba que la estadística suministra información necesaria –y válida– de los fenómenos observados, representando la manera en que se manifiesta la determinación imperfecta que hacemos de los fenómenos, dada la imposibilidad de seguir la evolución de cada átomo individualmente.

---

<sup>19</sup> Heisenberg., *Encuentros y conversaciones...* p. 21

<sup>20</sup> De hecho “Planck llegó a la interpretación de sus resultados en términos de un espectro de discreto de energías para los osciladores de las paredes, sólo después de que múltiples fracasos le hicieron desistir de todo intento de explicación en términos de espectros continuos [...] Por su parte, a partir de 1905, Einstein inició un análisis novedoso de los resultados de Planck y les imprimió un carácter diferente y más general [...] Einstein llegó a esta conclusión a través del estudio del comportamiento estadístico de un campo de radiación monocromático muy tenue, mostrando que bajo estas condiciones las cosas suceden como si el campo tuviera una estructura discreta, es decir, como si fuera algo similar a un gas diluido, en el cual las moléculas individuales, que son independientes entre sí, son las responsables de las fluctuaciones.” (de la Peña., *Introducción a la...* p. 7).

En la teoría cuántica, por el contrario, la estadística cobra una enorme relevancia, al considerarla absolutamente indispensable por suponer que las leyes más profundas y elementales de la naturaleza son de carácter estocástico; es por ello que la estadística en la teoría cuántica no se asocia con nuestro conocimiento o ignorancia de la indeterminación de los eventos, sino más bien con la indeterminación propia de la naturaleza (indeterminación que puede derivarse de las fluctuaciones energéticas relacionadas con la estabilidad del sistema) que lleva a que se haga presente en forma de regularidades estadísticas; esta indeterminación natural sería la causante de las discontinuidades cuánticas y su paradigmática e indisoluble unión con la constante de Planck.

Pero incluso a nivel clásico afrontamos problemas similares a estos, excepto por el manejo del cuanto de acción, sin incurrir en una indeterminación como la de la teoría cuántica; por ejemplo, en la mecánica clásica se cuenta con una gran variedad de casos en que un sistema en observación se ve afectado por fuerzas que actúan simultáneamente sobre él, encontrándose presentes una fuerza sistemática<sup>21</sup> y fuerzas estocásticas variables con el tiempo (por ejemplo, de fricción o de viscosidad). En tales problemas, encontramos que al sumar las fuerzas en cuestión –una de ellas conocida y la otra de naturaleza estocástica– la fuerza neta que experimenta el objeto será de carácter estocástico.<sup>22</sup> De acuerdo con las leyes de la mecánica newtoniana, dicha fuerza determinará la trayectoria y la velocidad de la partícula, sin embargo, en nuestro caso, dado que la fuerza neta es estocástica, tanto la velocidad como la trayectoria serán estocásticas. Así que la solución del problema radicará en determinar, en el mejor de los casos, las distribuciones de posición y velocidad del sistema, aun cuando no haya manera cierta de determinar los valores precisos de posición y de velocidad instantáneamente. Como se ve, la imprecisión aquí no implica indeterminación, en el sentido de insuficiencia predictiva o explicativa, sólo asegura inexactitud en el sentido de la mensurabilidad experimental.

Pues bien, algo similar ocurre a nivel atómico, con la salvedad de que se hacen presentes las discontinuidades cuánticas –discontinuidades que es imposible determinar de antemano– que, aunadas a la discontinuidad propia del sistema bajo estudio, hacen

---

<sup>21</sup> La fuerza sistemática es aquella que actúa constantemente y de la misma manera sobre los sistemas. En un momento dado, si sus efectos son pequeños respecto de otras fuerzas actuantes, se le puede ignorar. Por ejemplo, el peso de las partículas atómicas es despreciable frente a las fuerzas eléctricas y magnéticas.

<sup>22</sup> Ya que:  $\vec{F} = \vec{F}_{sistemática} + \vec{F}_{estocástica}$ .

imposible seguir el curso evolutivo del sistema y con ello, su consecuente predicción. En estos casos la probabilidad se asume como el único medio cuantitativo eficaz para predecir pero, dado que es obligatorio verificar si nuestro pronóstico acerca de la evolución del sistema fue acertado, debemos observar su comportamiento; pero encontramos que el intento de medir ocasiona perturbaciones en la diacronía del evento, llevándonos a decir que ha sido la intromisión del observador la que estableció, con sus ánimos de medición, una interdependencia no mensurable entre el observador y lo observado, rompiendo la independencia observacional clásica, que es precisamente lo que PIH enuncia.

Es por ello que PIH, al sostener la tesis de una realidad física azarosa en sí misma –donde la probabilidad es una característica propia del arreglo experimental (es decir, del observador) y su interacción con la entidad atómica– objetiva el azar y torna imposible, de entrada, prever el comportamiento y trayectoria de los objetos atómicos pues nunca podremos conocer con exactitud sus condiciones iniciales –y menos aún sus características esenciales– en el tiempo previo a aquél en que se inicia la medición. Sin duda alguna, esta idea es sumamente interesante pues, de alguna manera, independiza las leyes de la probabilidad y la estadística de las leyes naturales, dotándolas de existencia propia y asignándoles un lugar dentro de la naturaleza misma, y haciendo además que sean las leyes más profundas y esenciales dentro del acontecer natural. Para quien esto escribe, sin embargo, es una controversia de índole metafísica decidir si las leyes naturales dependen o no de las leyes estadísticas, o si son las leyes últimas de la naturaleza; tal como expuse en el capítulo 2, pienso que son las leyes naturales las que tienen una existencia verdadera y que las leyes estadísticas son una consecuencia de nuestro desconocimiento de la totalidad de factores que aparecen en un evento. Pero creo que aún puedo decir que dentro de la física, es un deber proponer, y buscar instaurar, las leyes naturales como un recurso eficaz que nos conduce a encontrar la causa de que los eventos discurran de una u otra manera, independientemente de si el determinismo se encuentra presente o no en la naturaleza. Es precisamente la postulación de leyes naturales quien nos lleva a alcanzar modelos simples y efectivos que pretenden dar explicación del acontecer natural, sin importar qué idea tengamos de lo que llamamos realidad; es decir, la idea del causalismo y de las leyes naturales es, de alguna manera, una cuestión más estética y autocomplaciente que la de la regularidad estadística, pues esta última idea no tiene más que sustentos argumentativos de tipo

situacional, sin llegar a alcanzar una mayor profundidad conceptual, pues basta con decir que la regularidad estadística –que dentro de sí misma es bastante probable o improbable que se alcance– se da por qué es una condición a la que la naturaleza es proclive. En suma, para quien escribe, son las leyes naturales las (leyes) verdaderamente profundas, y las leyes probabilístico-estadísticas se derivan de las primeras en tanto que desconocemos todas las variables y minucias que inciden en la ocurrencia de un suceso natural. En este sentido, el indeterminismo –o el determinismo, da igual el caso– es una apreciación teórico-argumentativa que emana de la cuantización natural de los sistemas cuánticos y que tiene como trasfondo la visión de una naturaleza discreta y el rechazo a definir en qué consiste la realidad –definida incluso operativamente– subsistiendo la impresión de que lo único realmente relevante es que exista concordancia entre lo que dicta la teoría y lo que muestran los datos experimentales, de tal suerte que, incluso hoy día Hawking ha pronunciado que: “No exijo que una teoría corresponda a la realidad porque no sé lo que es. La realidad no es una cualidad que se pueda comprobar con papel tornasol. Todo lo que me interesa es que la teoría prediga los resultados de medidas”.<sup>23</sup> Esta postura ha subsistido en la teoría cuántica desde sus inicios, y posteriormente, en este trabajo, volverá a hacerse presente.

Así pues, encontramos que PIH ‘legisla’ la incerteza en el conocimiento que tenemos de los objetos atómicos al declarar que siempre hay un nexo indisoluble entre el azar y el instrumental de medida (y consecuentemente, con la estadística) debido a que en el nivel cuántico las energías son tan pequeñas que incluso la medición más fina y cuidadosa se traduciría en perturbaciones incontrolables del evento observado, imposibilitando así saber si los resultados (de la medición) verdaderamente describen lo que habría ocurrido en ausencia de los dispositivos de medición. Pero no sólo eso, sino que PIH también convalida la conjunción partícula-onda en una sola entidad física, conceptos que en física clásica, si bien están relacionados, son totalmente ajenos;<sup>24</sup> la superposición en la teoría cuántica de estas imágenes clásicas es lo que conocemos como Principio de Complementariedad de Bohr (PCB) y está estrechamente ligado a PIH; con ello, PIH y

---

<sup>23</sup> Penrose., *El camino a la realidad...* p. 1053.

<sup>24</sup> En el sentido de los conjuntos, es decir, no presentan características comunes. Y es que en la teoría clásica las partículas se asocian con la materia, mientras que las ondas se asocian con la transmisión de energía sin que haya movimiento de las partículas (en la dirección de propagación de la onda). Es así que tenemos ondas mecánicas u ondas electromagnéticas; en las primeras hay movimiento del medio donde se propaga la perturbación, mientras que las ondas electromagnéticas se propagan por la oscilación de los campos, por lo que no requieren de medio material para propagarse.

PCB, al alimón, expiden carta de existencia real a la dualidad de los objetos cuánticos y reducen la gravedad del problema de existencia a un problema de índole epistemológica que, de acuerdo a la experimentación, se vuelve un caso trivial por determinar unívocamente qué obtendremos en un experimento dado: onda o partícula. En este caso digo que es trivial porque, de entrada, ya admitimos, por axiomatización y por consenso (debido a los datos experimentales), que el objeto atómico tiene naturaleza dual, y que si un experimento se diseña para mostrar del objeto un comportamiento ondulatorio, eso obtendremos; y lo mismo ocurre en el caso de las partículas. Así, y en un ánimo simplista, podríamos decir que en un experimento determinado tendremos una probabilidad (referida a la ocurrencia previa al proceso de medida) de  $\frac{1}{2}$  de que el objeto atómico se comporte como onda, y una probabilidad de  $\frac{1}{2}$  para un posible comportamiento corpuscular.

Pero este caso, axiomáticamente trivial, desemboca en problemas subyacentes verdaderamente importantes como la de cuál es la verdadera naturaleza del objeto atómico, además de comprender cuál es la causa del comportamiento específico que asume el objeto atómico según el experimento al que sea sometido y, la incertidumbre (o incerteza) asociada con la medición. Gracias a PIH y PCB, podemos asegurar una justificación basada en los hechos medibles y válida matemáticamente, pues el segundo principio postula el comportamiento dual mientras que el primero sostiene que no se puede ir más profundamente, so pena de modificar el sistema observado, puesto que

[...] se ha visto que en mediciones físicas, necesariamente se implica una interacción entre el observador y el sistema bajo observación. Para medidas de este tipo, los entes disponibles son la materia y la radiación. Las relaciones  $p=h/\lambda$  y  $E = h\nu$ , se aplican tanto a la radiación como a la materia, constituyendo así la expresión de la dualidad onda partícula. Cuando estas relaciones se combinan con las propiedades universales a todas las ondas, se obtienen las relaciones de incertidumbre. Por lo tanto, el principio de incertidumbre es una consecuencia necesaria de esta dualidad, es decir, de las relaciones de de Broglie-Einstein; y el principio de incertidumbre en sí constituye la base de la tesis de Heisenberg-Bohr de que la probabilidad es fundamental para la física cuántica.<sup>25</sup>

Pero veamos esto. Declarar, así sea axiomáticamente, la dualidad como característica propia del objeto atómico no es más que un razonamiento abstracto que ajustamos para que esté en consonancia con el acontecer natural atómico, aunque el problema de cómo es que coexisten dos imágenes excluyentes en un único objeto siga vigente, es decir,

---

<sup>25</sup> Eisberg-Resnick., *Física cuántica. Átomos...* p. 103

sigue siendo un misterio como le hacen la onda y el corpúsculo para coexistir; la teoría cuántica no dice cómo se da tal conjunción de imágenes, pero soluciona el problema práctico al postular la naturaleza dual. Este desconocimiento objetivo de la verdadera esencia del objeto atómico no ha podido ser resuelto hasta hoy, aunque hay serios intentos de mostrar su verdadera naturaleza. Ahora bien, en nuestra realidad macroscópica no hemos observado algún objeto –excepto la luz– que tenga ambas características, por lo que la postulación de la dualidad suena más a “ajuste teórico” de una observación que a solución física real del problema. Aun así es posible entender el por qué de esta postulación pues, de manera obligada y ante la imposibilidad de escudriñar el interior de los objetos atómicos para conocer cuál es su verdadera naturaleza, optamos transitar por el camino más simple justificándonos con el argumento de conformar un cuerpo teórico coherente; esto nos ha llevado a atribuir la naturaleza dual a los objetos microscópicos como si fuese una nueva característica de su ser, conscientes de que aunque ignoremos verdaderamente el por qué de tal comportamiento, esta nueva ‘propiedad’ no es más que una potestad descriptiva que se deriva allende el experimento<sup>26</sup> y que favorece –e impulsará– las deducciones lógicas propias de un desarrollo matemático aplicable directamente a la ocurrencia de los fenómenos naturales, cosa que hacemos porque estamos convencidos de que los resultados obtenidos tienden a coincidir con los datos experimentales. En este caso, quizá procedamos arbitrariamente, pero convencionalmente admitimos que nuestras proposiciones matemáticas son una regla de correspondencia biunívoca con los fenómenos reales.<sup>27</sup>

Así pues, dado que no podemos justificar de manera fehaciente –y en forma real o material– la dualidad, entonces lo hacemos teóricamente, apelando a la axiomatización y a la matemática. En esto, el proceso de construcción del andamiaje teórico cuántico es análogo al proceso que se dio en el seno de la termodinámica al introducir las leyes de la

---

<sup>26</sup> Es decir, no dentro del experimento mismo, sino que fuera de él. Quizá sea representándolo ideográficamente.

<sup>27</sup> Por ejemplo, podríamos decir que algunas de tales reglas serían: la abstracción de los objetos, la monotonía del tiempo y el orden de ocurrencia, es decir, la secuencialidad de los eventos, condiciones de suficiencia y necesidad, la logicidad de los sucesos, etc. Creo que por esto introducimos la causalidad como una regla básica que se establece a partir de la observación que hacemos del acontecer natural. Es decir, lo que observamos no son, bajo ningún aspecto, las causas de un evento, pues éstas son un elemento explicativo del por qué de la ocurrencia. Las causas son, *grosso modo*, deducciones lógicas que provienen de determinada representación que hacemos del evento. La representación más común suele ser el modelaje matemático. Sin embargo, al eliminar las causas, hacemos de lado la explicación del porqué del acontecer natural, sometiéndolo a factores fortuitos que, al ir al fondo de las cosas, son incapaces de dar razón del por qué de las regularidades estadísticas.

termodinámica, o conceptos como entropía o entalpía: son conceptos creados a partir de hecho experimentales. Es exactamente el mismo caso en la teoría cuántica, puesto que la solución al problema de la dualidad se encuentra cuando se postula la existencia de tal propiedad, dado que el problema dual surge de inferencias que hacemos a partir de las evidencias experimentales y no podemos intervenir el objeto para determinar cómo es que subsisten dos entidades tan distintas.

Ahora bien, la dualidad que hemos admitido como válida debe satisfacer ciertas condiciones o causas de ocurrencia, así sean probables, por lo que no nos resta más que manifestarlo en postulados o axiomas, y esto se satisface completamente. Entonces, la teoría cuántica puede ser considerada, en el fondo, y después de solucionar el problema de la dualidad, una teoría causalista, pero con tintes probabilistas; de entrada, se asume que todos los objetos atómicos poseen naturaleza dual, y su manifestación en onda o partícula dependerá de a qué clase de observación externa se le someta. Así, esta faceta causalista-probabilista vindica el proceder natural al considerar que la realidad, si no es de naturaleza matemática, al menos es matematizable, y si tal fuese el caso, la teoría cuántica en realidad se estaría enfocando a dar una explicación de índole matemática, que no física, de su objeto de estudio.

Y es que para explicar la realidad cuántica, la teoría se sustenta en la probabilidad y la estadística dado que el submundo cuántico se muestra aleatorio en nuestras mediciones, aunque exhibe una regularidad estadística. Tal aleatoriedad se hace presente en el comportamiento de los objetos atómicos, y tanto PIH como PCB, después de postular la naturaleza dual (a la que simplemente aludiré como dualidad o entidad dual, en el entendido que nos referimos a su comportamiento), simultáneamente proponen la imposibilidad de conocer el comportamiento real, en un instante dado, de un objeto atómico, por lo que la relación estructural que los conforma nos conduce directamente del azar objetivo propuesto inicialmente por PIH a un azar epistémico, pues ambos principios –en conjunto– nos aseguran que no tenemos un conocimiento preciso del tipo de objeto atómico con que tratamos, aunque tengamos la certeza de que tratamos con una “partícula-onda” que se manifestará según se le requiera. Es éste el problema de fondo. Pero este problema es también consecuencia de otra deducción pues experimentalmente es imposible recolectar datos únicos para cada entidad individual, quedándonos como única alternativa la recolección de conjuntos de datos relativos al comportamiento de muchos objetos, y donde suponemos que todos y cada uno de los objetos tratados

individualmente se comportarán de manera parecida a como lo hacen los demás, aunque mostrando ciertas desviaciones del comportamiento esperado.

Este manejo estadístico ha propiciado que la probabilidad en la teoría cuántica, a pesar de ser considerada inicialmente una herramienta (matemática) secundaria, haya llegado a ser más que un simple recurso metodológico; de hecho, actualmente es el bastión que permite interpretar los resultados experimentales para interpretarlos bajo los enunciados teóricos que nos ponen en contacto con el micromundo, volviéndolo así más entendible. Rolleri se expresa así a este respecto:

La importancia e influencia de esta interpretación (*de probabilidad frecuentista*),<sup>28</sup> tanto en la física como en la filosofía de la ciencia, no pueden subestimarse. Por un lado los físicos de la escuela de Copenhague –destacadamente Bohr, Heisenberg y Pauli, y otros, como Max Born– la introdujeron en la mecánica cuántica, convirtiendo a la también llamada interpretación estadística en la forma estándar de entender los enunciados probabilistas cuánticos referentes a colectivos de partículas elementales. Por otro lado, los filósofos del empirismo lógico –principalmente Carnap, Reichenbach, Nagel y Hempel, y otros, como Karl Popper– la adoptaron, subyaciendo en sus tesis y discusiones acerca de problemas en los que el concepto de probabilidad entra en juego, como el de la explicación científica.<sup>29</sup>

Pero la probabilidad y su relación con el azar motivaron la discusión entre los físicos al cuestionar si la interpretación de ésta (la probabilidad) efectivamente explica o, en su defecto, describe –al menos intuitivamente– el acontecer atómico. Mientras que los físicos tradicionalistas optaron por la probabilidad clásica, los físicos cuánticos se inclinaron por la interpretación frecuentista. Sin embargo, la probabilidad en sí misma no explica porqué ocurren las cosas, sino que sólo se concreta a describir cómo es que ocurren, haciéndolo mediante la cuantificación de las posibilidades de ocurrencia de los sucesos. La controversia se desató porque los apologistas de la probabilidad clásica y su equiprobabilidad (de ocurrencia) consideraron que la probabilidad cuantifica nuestro grado de certeza (o ignorancia) de la ocurrencia del evento, por lo que el azar es epistémico dado que desconocemos qué factores influyen en el evento. Pero para los defensores de la probabilidad frecuentista –que mide la cantidad de sucesos exitosos entre el total de intentos– el azar es objetivo, al ser una característica de la naturaleza cuántica. En este sentido, Martínez lo expresa pulcramente al clasificar los tipos de azar, cuando asevera que

---

<sup>28</sup> La acotación es mía.

<sup>29</sup> Rolleri, J. L. (2009): *Probabilidad, causalidad y explicación*; Serie Filosofía, Universidad Autónoma de Querétaro. México. p. 80.

[...] La idea de esta distinción es que el azar epistémico es el resultado de nuestra ignorancia de información o de condiciones objetivamente dadas, mientras que el azar ontológico u objetivo es parte de la realidad física [...] Un azar puramente epistémico es el azar que se considera un producto de nuestra ignorancia de condiciones objetivas no azarosas “en principio”. La interpretación clásica de las probabilidades consideraba que todo azar era de este tipo [...] <sup>30</sup>

Y cuando se refiere a la interpretación probabilista que Bohr sostiene, agrega:

Hay dos maneras en las que podemos entender la naturaleza del azar cuántico en el marco de la interpretación de Bohr. Como veremos, es posible pensar que el tipo de azar cuántico implícito en las descripciones de estado que asumen al postulado cuántico es un azar epistémico objetivo. Éste es el tipo de azar que Bohr parece haberle atribuido a la mecánica cuántica. El postulado cuántico jugaría el papel de restricción objetiva al proceso de observación, a partir del cual se generan las descripciones azarosas características de la mecánica cuántica... El azar sería entonces epistémicamente irreductible, pero sistémicamente reductible. En el caso de la mecánica cuántica podríamos hacer un análisis similar. El postulado cuántico impondría un límite físico que no permitiría la predicción con certeza de una medición. <sup>31</sup>

La discusión entonces es de fondo. Si bien el uso de la probabilidad en la teoría es innegable, habría que ver la trascendencia de su uso. Por ejemplo, como se mencionó anteriormente en esta sección, Boltzmann utilizó la probabilidad y la estadística eficazmente para generar conceptualizaciones sencillas y fácilmente aprehensibles de problemas que involucraban un gran número de entidades moleculares; este uso de la probabilidad y la estadística vino a facilitar la comprensión de por qué los sistemas asumen determinados comportamientos, facilitando así predecir datos que concuerdan con los datos experimentales y que explican, <sup>32</sup> a fin de cuentas, el por qué de tal comportamiento; por ejemplo, los calores específicos de algunas sustancias. Esto sin duda alguna redundó en una ampliación del marco conceptual que después se fortaleció y se volvió modelo explicativo para otros fenómenos.

---

<sup>30</sup> Martínez, M. S. (1991): *El azar en la mecánica cuántica: de Bohr a Bell*; en: *Crítica*, Revista Hispanoamericana de Filosofía. Vol. XXIII, No. 69 (diciembre 1991).pdf: 137-154.

<sup>31</sup> *Ibid.*, Martínez. *El azar en la mecánica cuántica*...

<sup>32</sup> Explicación –de *explicatio*: acción de desplegar o desenvolver– viene a significar el hecho de desvelar aquello que no es visible o perceptible a la luz de la razón; es decir, sería “el proceso cognoscitivo mediante el cual hacemos patente el contenido o sentido de algo, que puede ser: (i) un suceso o una cosa del mundo: en su génesis, causas, constitución, y en las leyes que rigen el proceso de su formación, duración y desaparición, y (ii) el contenido, como significado, de un concepto o discurso a partir de las palabras o frases que expresan un referente, en último término como cosa o suceso del mundo”. Explicar sería entonces “dar razón” del qué, por qué, para qué, y el cómo de las cosas y de los sucesos del mundo. (<http://es.wikipedia.org/wiki/Explicaci%C3%B3n>).

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Pero en el caso cuántico no ocurrió del todo así, pues la teoría no buscó explicar el por qué de los fenómenos cuánticos,<sup>33</sup> o al menos no en el sentido habitual, sino que se concretó a solucionar los problemas que se presentaban, y lo hizo eficientemente; inicialmente se creó una teoría algorítmica que con el tiempo fue asentándose, hasta llegar a ser el edificio teórico que hoy es. Esto despertó un sinfín de objeciones (sobre todo de tinte realista) por parte de sus detractores, al considerar que la teoría era ininteligible en sus bases conceptuales mismas y se reducía a recolectar datos experimentales susceptibles de interpretación; las principales objeciones aludían al determinismo, la continuidad y la objetividad. Pero la respuesta de los físicos cuánticos a tales impugnaciones se presentó inmediatamente anteponiendo la probabilidad para confrontar el determinismo y, con la declaración de postulados que, además de eliminar las contradicciones internas (dualidad onda-partícula), dieran salida a las otras objeciones; PIH y PCB sirvieron para enfrentar muchas de ellas.

Digo esto porque me parece que cuando aparecen PIH –y su estrecha relación con la probabilidad– y PCB, se encuentra solución a un conjunto de dilemas teóricos internos que, de entrada, se apreciaban indisolubles, comenzando con la coexistencia de imágenes excluyentes, la existencia de un límite inferior que acota el conocimiento de los sistemas físicos y por supuesto, la indeterminación en la medición.<sup>34</sup> Es decir, son dichos principios quienes garantizan, en buena medida, la razón de ser de la teoría, aun cuando a ésta se la considerara una teoría descriptiva e instrumentalista, más que una teoría explicativa.

En suma, podemos asegurar que PIH adquiere verdadera trascendencia físico y filosófica al limitar las posibilidades teórica y empírica de allegarnos conocimiento de cómo puede ser la naturaleza subatómica pues, al imponernos una cota inferior que nos indica cuál es la mínima información que podemos obtener acerca de los objetos atómicos, nos impide acceder para validar o refutar su propuesta. Pero esta veda teórico-experimental que PIH nos endilga no sólo no nos permite conocer el estado completo y la

---

<sup>33</sup> Desde mi punto de vista, creo que sí explicaba por qué ocurrían los eventos, sólo que lo hacía desde un punto de vista muy matematizado, y a veces utilizando ideogramas rudimentarios y altamente simplificados. El modelo del sistema planetario solar utilizado por Bohr es un buen ejemplo, y otros son el uso de los vocablos onda y partícula. Lo que ocurre es que en física, como en casi todo, estamos acostumbrados a secuenciar conceptos (como la ilación en un discurso) que nos lleve a generar imágenes mentales sencillas, permitiéndonos con ello hacer inferencias certeras y precisas. La mecánica cuántica, al provenir de evidencias empíricas –y ser ciencia inductiva– y ser netamente probabilista, rompe con el cartabón clásico de “teoría explicativa”.

<sup>34</sup> En este caso, la indeterminación se asocia al concepto de incertidumbre.

trayectoria del sistema –puesto que  $\Psi$  es de carácter probabilista– dada la discontinuidad de los eventos, sino que también nos induce a pensar libremente si Heisenberg, en efecto, no tenía razón al decir que el objeto atómico no es más que una posibilidad de ocurrencia, es decir, que en vez alcanzar el grado de “ser en acto” se vuelve un “ser potencial” que se manifiesta de forma determinada sólo cuando lo requiramos. Fernández Rañada lo expone nítidamente al decir

[...] La interpretación estadística de Born tomaba así un sentido más radical: la función de onda no se refiere a un fenómeno continuo, sino a una distribución de la probabilidad de encontrar al electrón en torno a un punto, pero manifestándose éste siempre de modo puntual y discontinuo. Más tarde, Heisenberg acudió al concepto aristotélico de “ser en potencia”, opuesto al de “ser en acto”, para interpretar la función de onda como “una red de potencialidades”.<sup>35</sup>

Como vemos, hoy continúan vigentes los problemas de la dualidad y del conocimiento completo de los sistemas físicos microscópicos, pero esta problemática subsiste porque estamos empeñados en conocer la realidad tal y como es. Sin embargo, a veces parece que es la realidad misma quien ha limitado nuestra injerencia al conocimiento del micromundo, dejándonos ver, parafraseando a Platón y su mito de la caverna, sólo las sombras de la realidad cuántica.

## 5.2 PIH y los problemas de la medición

¿Qué nos explica PIH? Aparte de asumir el rol de un instrumento matemático inmerso en una estructura teórica ¿nos dice algo de cómo es la realidad? La respuesta inicial es, y abordándolo desde un punto de vista tradicional y realista: no precisamente, al rehusarse a dar explicaciones físicas convincentes acerca de cuál es la realidad subatómica. Y es que PIH, PCB y casi la totalidad de la teoría cuántica, al carecer de las más elementales nociones de la verdadera naturaleza de los objetos microscópicos se concretan, si se puede decir así, a describir matemáticamente los fenómenos observados, negándose a conjeturar cómo es el mundo que está fuera de nuestro alcance observacional y renunciando con ello a dar una descripción realista –en el sentido habitual–; no obstante, aun cuando la teoría cuántica se aleja de dar una explicación física, sí da una explicación matemática del comportamiento de los objetos atómicos. Esto lo vieron con claridad Heisenberg, Bohr y Born, quienes optaron por anteponer el formalismo matemático a una

---

<sup>35</sup> Fernández-Rañada., *Ciencia, Incertidumbre ...* p. 111.

posible “visualización” que condujera a un desarrollo conceptual análogo al predominante en la física clásica; a tal visualización (clásica) le denominaron ‘representación pictórica’<sup>36</sup> –que está basada en la generación de modelos físicos: sencillos, intuitivos y fácilmente representables, no sólo matemáticamente–, convencidos de que la realidad del micromundo sólo puede asirse si se apega a una legislación de carácter matemático. Esto es encomiable pues el problema no es simple, dado que la transferencia de conceptos clásicos al nivel cuántico no es funcional, y tampoco es fácil suponer que las leyes que rigen los cuerpos macroscópicos son una mera extensión, o el resultado, de las leyes que gobiernan los átomos individualmente. No es fácil comprobar que sólo porque la materia está constituida por entidades más pequeñas éstas deben mantener los mismos atributos físicos del sistema original. Eso ya no es admisible, pues si bien es verdad que las características de los cuerpos a nivel ordinario se mantienen hasta el nivel molecular (debido a la aditividad de la materia, aunque pudiera haber ligeras modificaciones debido al grado de complejidad de la estructura, que mantiene propiedades generales, particulares y específicas),<sup>37</sup> al adentrarnos en las profundidades atómicas, las características se diluyen o modifican, comenzando por el concepto de inercia que presentan los objetos atómicos.<sup>38</sup>

---

<sup>36</sup> Esta representación pictórica se refiere al modelaje característico de la física clásica, donde convenimos que un modelo es una representación que se hace de la realidad, con la intención de simplificar su estudio y comprensión. Según Struik, documentos antiguos muestran que los primeros personajes que utilizaron un modelo para solucionar un problema fueron Eudoxo de Cnidos (alrededor de 408-355 AC) y Arquímedes. Es famoso el ‘método de exahución de Eudoxo’ (o método de agotamiento) empleado para encontrar áreas y volúmenes (que no es más que un cálculo integral en ciernes), además de que se asegura que fue la primer persona en plantear un modelo planetario (geocéntrico) basado en un modelo matemático –por eso se le considera el padre de la astronomía matemática. Fue él quien introdujo el uso de la *lemniscata* esférica– ([http://es.wikipedia.org/wiki/Eudoxo\\_de\\_Cnidos](http://es.wikipedia.org/wiki/Eudoxo_de_Cnidos)). De Arquímedes se tiene una carta dirigida a Eratóstenes (alrededor de 250 A. C.) en la que le describe un modo fértil, aunque no riguroso, de encontrar resultados relacionados con volúmenes de los átomos. Newton y Kepler usaron las mismas concepciones de tipo geométrico [...] e incluso, “durante el renacimiento, y aun en siglos posteriores el reloj fue tomado como modelo del Universo”. (Struik, D. J. (1948): *Historia concisa de las matemáticas*; IPN. México, 1994. pp. 63-66 y 136).

<sup>37</sup> Por ejemplo, la masa de un sistema es una propiedad general de la materia, y se debe a la propiedad aditiva de las masas. Otras propiedades relacionadas con ésta son el peso y la inercia, así como el volumen y la capacidad de no ocupar el mismo espacio simultáneamente. Hay otras propiedades de este tipo que no necesario enumerar aquí. Dentro de las particulares, se tendrían aquellas que pertenecen a determinados grupos de materia, por ejemplo, los conductores y su dureza, ductibilidad, maleabilidad, conductividad, etc. Las propiedades específicas distinguen a una sustancia de otra, por ejemplo, densidad, peso específico, sabor, color, etc.

<sup>38</sup> Por ejemplo, en el caso de un fotón, o de un neutrino, que se han definido con masa en reposo cero, resultaría que su inercia es ¡cero! Lo cual es problemático de entender. Con ello se garantiza la constancia en la velocidad de la luz.

¿Cómo explicar entonces los fenómenos atómicos individuales? Uno como físico, al hallarse en un problema de tal envergadura, considera que su primer deber es proponer ideas y estructuras matemáticas que guarden consistencia interna y que sean confrontadas continuamente con eso que llamamos realidad, pues “una idea se propone como una herramienta para calcular, no como una representación de cómo son las cosas”.<sup>39</sup> Y fue lo que hicieron los físicos cuánticos... Sin angustiarse por si la teoría, inicialmente, no puede mostrarnos como es la realidad subyacente. Más aún, los físicos cuánticos, al ser criticados, certifican su postura al argüir que lo único que hacemos es interpretar el mundo natural,<sup>40</sup> por lo que elevan la petición de reconsiderar la cuestionable validez de una representación pictórica del microcosmos, representación que consideran innecesaria por vacua, puesto que no tenemos experiencias sensoriales de ninguna especie –a no ser las experimentales– relacionadas con el micro-universo, por lo que, más que favorecer la búsqueda de encontrar una explicación racional de la fenomenología atómica, tal representación podría constituirse en un severo impedimento para seguir avanzando; es por ello que consideran obligatorio describir y/o predecir la realidad que los experimentos se empeñan en mostrar una y otra vez, proponiendo para ello instrumentos o alternativas de solución, aun cuando sólo sean de carácter matemático,<sup>41</sup> dado que la matemática es el lenguaje ‘natural’ de la ciencia al representar ideas y certificar resultados de una manera sencilla y breve. Sin embargo, para lograr la matematización de la naturaleza, es menester cumplir con una etapa primaria de tipo experimental o empírica, que es la etapa donde se recolectan los objetos de estudio que constituirán el futuro *corpus* teórico que indicará dónde y qué buscar o hacia dónde derivar y cómo llevar a cabo los procesos de medición asociados a los objetos. Heisenberg alude a esto que digo, al expresar:

---

<sup>39</sup> Hacking, I. (1996): *¿Qué es el realismo científico?*, en: *Representar e intervenir*; Paidós-UNAM. México. p. 48.

<sup>40</sup> Donde una interpretación podría entenderse como “algo parecido a una imagen, un modelo intuitivo, una posibilidad de visualización de los fenómenos” (Agazzi, E. (1978): *Temas y problemas de filosofía de la física*; Ed. Herder. Barcelona. p. 322.

<sup>41</sup> Creo que la visión de la matematización proviene de los griegos; y en cuanto a lo de que son instrumentos, lo digo en el sentido en que Hacking alude al instrumentalismo, al decir que: “Uno puede negar el ingrediente ontológico. Se puede negar que las teorías deban entenderse literalmente; no son o bien verdaderas o bien falsas; son herramientas intelectuales para la predicción de fenómenos; son reglas para averiguar qué pasará en casos particulares. Hay muchas versiones de esta idea. Una idea de este tipo es a menudo llamada instrumentalismo porque dice que las teorías son solamente instrumentos”. (Hacking... *¿Qué es el realismo...* p. 47).

[...] Recordé que Einstein me había dicho: «Es siempre la teoría la que decide lo que se puede observar». Tomado en serio, significaba que no había que preguntar «¿cómo podemos representar la trayectoria del electrón en la cámara de niebla?», sino: «¿no será que en la naturaleza sólo se dan aquellas situaciones que pueden representarse en la mecánica cuántica o en la mecánica ondulatoria?»<sup>42</sup>

Después de la etapa experimental será necesario introducir una fase simbólica sustentada en la representación analítica de las magnitudes medidas, las relaciones existentes entre ellas y el tipo de modificaciones que podrían experimentar (y bajo qué posibles condiciones se darán); y por último, habrá que instituir una etapa de carácter deductivo que imponga cierta normatividad lógica que funja como cimentación de la teoría e impulse su desarrollo posterior, permitiendo la predicción, y cuando sea posible, la explicación. Es así que la teoría será el filtro que decanta la observación y la información que nos allegamos. Esto, si bien presenta un sinfín de ventajas, también conlleva sus riesgos, de entre los que sobresalen el querer ver las cosas sólo a través de la teoría, lo que puede ocasionar que emitamos juicios sesgados; así, todo aquello que no se apega a la ortodoxia teórica, se refuta. La teoría cuántica no es la excepción y procede de esa manera, siendo ella la que guía el quehacer de los científicos y tamiza, de algún modo, la manera de ‘apreciar’ la realidad, que en el caso cuántico es bajo el simbolismo matemático. Pero esto afecta la manera de abordar físicamente la realidad al poner en entredicho la existencia misma de las leyes naturales y sustituirlas por leyes probabilistas,<sup>43</sup> lo que a su vez rompe la concepción de una naturaleza determinista. Pero además, una teoría meramente matematizada como la física cuántica, que si bien satisface uno de los requerimientos de la física tradicional –que es la representación simbólica–, corre el peligro de parecer indiferente, o de no requerir *necesariamente* de la observación porque los resultados de los eventos cuánticos pueden ser derivados sólo matemáticamente, renunciando con ello a la posibilidad de explicar físicamente los fenómenos. Heisenberg nuevamente lo expone claramente, al decir:

Por fin tenía la oportunidad de hablar cara a cara con él. [...] Me hizo notar que en mi descripción matemática no aparecía para nada el concepto de «órbita del electrón», mientras que en una cámara de niebla sí podía uno observar directamente su trayectoria. [...] Cuando repliqué que me había limitado a emplear la clase de filosofía en la que él había basado su teoría especial de la relatividad, repuso: «Puede que en algún momento haya utilizado esa filosofía y que incluso haya escrito sobre

---

<sup>42</sup> Heisenberg... *Encuentros y conversaciones...* p. 35

<sup>43</sup> Que como vimos en capítulos anteriores, no presenta mayor dificultad, pues admitimos que las leyes naturales no son más que regularidades estadísticas a las que se les aplica el proceso de límite. Sin embargo, esto involucra, de suyo, una probabilidad *a posteriori*, lo que conlleva el riesgo del subjetivismo.

ella, pero no deja de ser un absurdo». Así pues, Einstein había revisado entretanto su posición filosófica en este punto. Me hizo notar que incluso el concepto de observación era de suyo problemático. Toda observación –argumentaba– presupone que entre el fenómeno a observar y la percepción sensorial que finalmente entra en nuestra conciencia exista una relación unívoca y conocida. Pero de esa relación sólo podríamos estar seguros si conociésemos las leyes de la naturaleza que la determinan. Ahora bien, cuando es preciso poner en duda esas leyes –como sería el caso de la moderna física atómica–, entonces el concepto de «observación» pierde también su claro significado. Entonces es la teoría la que determina lo que puede observarse. Tales consideraciones me eran completamente nuevas y ejercieron sobre mí una honda impresión; desempeñaron también más tarde un papel importante en mis trabajos y se revelaron harto fructíferas en el desarrollo de la nueva física.<sup>44</sup>

No obstante, Heisenberg prosigue con su idea, a tal grado que es el principal impulsor de la idea de imponer la matematización a la mecánica cuántica, pues debido a su juventud y sus pocos prejuicios científicos estaba dispuesto, incluso, a abandonar la transferencia de la terminología de la física clásica a la física cuántica (a pesar de que inicialmente él proponía su uso), ya que para él era más importante, inicialmente, solucionar los problemas, así sólo fuese matemáticamente, que preocuparse por dilemas filosóficos de si la teoría explica o describe los sucesos atómicos, pues

Heisenberg, thus, first suspends any possible picture of the emergence of these data in accordance with classical physics and its geometrical representation of such processes. Instead, he treats these data as “effects” divorced from any classical configurativity and hence also classical (there may be no other) causality as concerns their emergence. Heisenberg does not philosophically explore the epistemological consequences of the situation, of which he was only vaguely aware at the time. His main concern was to offer a mathematical formalism that would enable theoretical predictions in the situations where all previous attempts had failed. These consequences emerged in subsequent developments, both in Heisenberg’s own work and in the work of Bohr and others. The nature and significance, physical or epistemological, of Heisenberg’s contribution and, again, vision was, however, decisive, one of the great events in the history of the twentieth-century physics.<sup>45</sup>

Pero no nada más es Heisenberg quien así actúa, sino que también los demás científicos de la teoría cuántica se suman a tal postura y deliberadamente rehúsan adoptar un compromiso con una postura filosófica que los confronte con el supuesto de qué es la realidad, conscientes que después habrá que justificar, tanto física como filosóficamente, la significancia de los términos. Heisenberg lo explicita en sus memorias al justificar cómo es que Bohr comienza por asumir tal responsabilidad, pues

Indeed, the way in which Bohr had thought atomic phenomena since 1912 had always been something intermediate between physics and philosophy, and he had succeeded in explain the periodic system of

---

<sup>44</sup> Heisenberg... *Encuentros y conversaciones...* p. 123

<sup>45</sup> Plotnitsky, *Reading Bohr...* p. 26.

elements form atomic theory only by combining fundamental inquiry with the practical problems of experiment. Thus he formulated the new interpretation of quantum theory in the philosophical language to which he had become accustomed by 15 years acquaintance with atoms, and which seemed best suited to the problems involved. This was not, however, the language of one of the traditional philosophies, positivism, materialism or idealism; it was different in content, although it included elements from all these systems of thought.<sup>46</sup>

Así que inicialmente, y de manera comprensible, el interés principal de la mayoría de los físicos cuánticos fue dar una descripción matemática predictivo-experimental de los sucesos, con la idea de que es imposible conocer a fondo la realidad. Su devoción por solucionar problemas experimentales es notoria, por lo que se relega a un paso ulterior la tarea de mostrar y asegurar si las leyes cuánticas tienen existencia verdadera, lo que deviene en un desencuentro muy marcado de la teoría con las posturas materialista y realista de la física tradicional, lo que atrae las críticas y objeciones de otros físicos. Heisenberg refiere esto al decir que

The criticism of the interpretation of quantum theory came at first from the older physicists, who were not prepared to sacrifice so much of the edifice of ideas of classical physics as was here demanded of them. Einstein, Schrödinger and Von Laue did not regard the new interpretation as conclusive or convincing [...] However, all the opponents of the Copenhagen interpretation do agree on one point. It would, in their view, be desirable to return to the reality concept of classical physics or, more generally expressed, to the ontology of materialism; that is, to the idea of an objective real world, whose smallest parts exist objectively in the same way as stones and trees, independently of whether or not we observe them.<sup>47</sup>

Mientras Bohr buscaba cómo darle a la teoría un cariz explicativo, intentando maquillarla con un tono físico-realista, Heisenberg se arropa en una postura idealista platónica al manifestar que las leyes cuánticas no requieren de imágenes ideográficas convencionales, pues tienen existencia verdadera en cuanto que leyes matemáticas, y<sup>48</sup>

Dos rasgos son por tanto característicos del nuevo método: el intento de diseñar experimentos nuevos y muy exactos que idealizan y aíslan la experiencia, y con ello crean realmente nuevos fenómenos; y la

<sup>46</sup> Heisenberg., *The development...* p. 22.

<sup>47</sup> *Ibid.*, p 23.

<sup>48</sup> Esta controversia ancestral –respecto a si la matematización de la realidad explica el acontecer natural– vuelve a cobrar vigencia con la mecánica cuántica –es parte de la discusión entre Einstein y Bohr–. En: *De los efectos a las causas. Sobre la historia de los patrones de explicación científica*, de S. Martínez, UNAM. Ed. Paidós. (2001), se aborda tal problemática con todo detalle y de manera excelente. Allí se lee: “Hay dos grandes corrientes o tradiciones científicas que pueden distinguirse en la ciencia del siglo XVII, mediante las cuales se formula una respuesta al desafío escéptico en los fundamentos de la ciencia. Una parte de la importancia de la observación sistemática en la construcción del conocimiento, y la otra trata de articular la idea de que es posible tener conocimiento cierto e indubitable acerca del mundo empírico por medio de las matemáticas. Estas corrientes [...] se encuentran también en la ciencia griega”. (Op. citada. pp. 60-61).

comparación de estos fenómenos con relaciones matemáticas que se denominan leyes de la naturaleza [...] Estas ideas son las formas arquetípicas puras que Platón llamara ideas, y para el hombre son inteligibles en calidad de relaciones matemáticas [...] Seguimos utilizando este método en virtud de su éxito. La base esencial del mismo estriba en repetir los experimentos.<sup>49</sup>

Así pues, en lo que se refiere a la justificación filosófica, me parece evidente que las posturas de Bohr, Heisenberg, Born, y en general, de los físicos mecanocuánticos, es muy pertinente pues al no poder entender la realidad (atómica) y su funcionamiento, optan por comenzar a buscar cómo resolver los problemas planteados por los experimentos, en el entendido de que su visión no es distinta a la de cualquier otra persona –sea científico o filósofo– que observa lo que ocurre en su entorno natural y desea explicar el por qué de tal comportamiento. Obviamente, la descripción teórica que dan debe ser lógica y racional, y si hay que pasar por encima de la normatividad vigente, pues vale la pena intentarlo, conscientes de que esto puede ampliar, en caso de tener éxito, el marco conceptual de la teoría predominante e inclusive, impulsar la creación de una nueva teoría que permita explicar los sucesos bajo estudio. Efectivamente, eso es lo que ocurrió. Posteriormente, para los físicos cuánticos será menester no perder de vista las digresiones filosóficas que resulten de la nueva teoría, pues serán ellas, independientemente del alcance científico, quienes cuestionarán la significancia, trascendencia y repercusiones históricas, morales y sociales de la teoría.

Así, son Bohr, Heisenberg y Born, quienes se dedican con denuedo a encontrar solución a los problemas propuestos por los experimentos y posteriormente buscan resolver la problemática que plantea la fenomenología cuántica y las paradojas y/o contradicciones –en principio irresolubles, inherentes a las nuevas ‘explicaciones’– en que incurren al intentar solucionar, de manera urgente, los experimentos que continuamente se acumulan; se preocupan, por último, de dotar a la teoría de sentido filosófico, tarea ésta que asume Bohr al haber “sido el principal arquitecto de la interpretación actual de la mecánica cuántica, conocida como la *interpretación de Copenhague*. Su enfoque ha sido apoyado por la gran mayoría de los físicos teóricos de hoy”.<sup>50</sup> En el primer caso, se tiene la ‘explicación’ puramente matemática a la que poco a poco van dotando de mayor capacidad de miras, asociándole conceptos físicos que van relacionando, paulatinamente, con los experimentos; Bohr lo expresa cabalmente, al hacer una semblanza de la problemática que afrontaron, pues

---

<sup>49</sup> Heisenberg., *The development...* p. 7

<sup>50</sup> Eisberg-Resnick., *op. cit.*, p. 106.

Our conversations touched upon many problems in physics and philosophy, and the requirement of unambiguous definition of the concept in question was particularly emphasized. The discussions of problems in atomic physics were concerned above all with the strange character of the quantum of action in relation to the concepts employed in the description of all experimental results, and in this connection we also talked about the possibility that mathematical abstractions here, as in relativity theory, might prove to be useful. At that time no such perspectives were yet at hand, but the development of the physical ideas had just entered a new stage.<sup>51</sup>

Con ello la teoría va adquiriendo cuerpo y evolucionando gradualmente, eliminando, según sea el caso,<sup>52</sup> los conflictos lógicos que van surgiendo; esto les lleva a postular los principios de complementariedad, de exclusión, incertidumbre, etc., y asignarles un sitio acorde a las necesidades de la nueva teoría, cuidando de mantener vigentes muchas e importantísimas leyes o principios de la física clásica, leyes primordiales que asumen un papel estelar en la ciencia y que se han mantenido inamovibles debido a la contrastación empírica a la que se les ha sometido constantemente. Es así que la naciente teoría comienza a tonificarse y a regir los fenómenos bajo estudio,<sup>53</sup> ignorando justificar los por qué, pero diciéndonos los cómo, dónde y qué observar, buscando con ello preservar el carácter descriptivo de la física.<sup>54</sup>

Y es aquí donde se presenta el problema. Cuando hablamos de que la teoría cuántica es una teoría descriptiva y no explicativa, porque no podemos, mediante inferencias, llegar hasta los últimos reductos constitutivos de la materia, me parece injusto demeritarla hasta tal extremo pues pienso que bajo los cánones cuánticos y la matematización de la realidad, sí es explicativa. No es explicativa en el sentido tradicional, es decir, bajo las normas de la física clásica, pero debemos tener presente que ambas teorías se refieren a estructuras físicas u objetos (físicos) diferentes, y en ellas la interacción sujeto-objeto u objeto-instrumento de medición presentan características distintas y son difícilmente comparables. Si hablar de la realidad significa aludir a la realidad trascendente y dar

---

<sup>51</sup> *The Genesis of Quantum Mechanics*. 1962; en: Bohr, N. (1963): *Essays 1958-1962 on Atomic Physics and Human Knowledge*; Interscience Publishers (Richard Clay and Company, Ltd.). G. B. 1963. p. 91

<sup>52</sup> Por ejemplo, la propuesta de BKS (Bohr, Kramers & Slater), que en 1924 buscó dar explicación a un problema de óptica; dicha propuesta quiso mostrar una visión unificadora del campo electromagnético y las transiciones cuánticas en los átomos, además de dar una explicación estadística al efecto Compton, incorporando conceptos clásicos como la propagación continua de la radiación y su relación con la discontinuidad cuántica presente en los intercambios de energía-materia. La propuesta no prosperó y se desechó. (<http://www.springerlink.com/content/j193372106386512/>).

<sup>53</sup> En el sentido en que Kant lo dice –según Popper–: “Nuestro intelecto no toma sus leyes de la naturaleza, sino que impone sus leyes a la naturaleza”. (en: Popper... *Teoría cuántica y...* p. 27).

<sup>54</sup> El carácter descriptivo-‘explicativo’, entendido, en primera instancia, como la concordancia entre la teoría y el experimento.

razón de ella es el requisito para tener una teoría explicativa, entonces, es claro que en el fondo ninguna teoría es cien por ciento explicativa. De hecho, tengo la impresión de que los ‘por qué’ los vamos generando a través de la maduración de los modelos teóricos, llegando con el tiempo a alcanzar cierto clímax “explicativo” conforme se acumulan evidencias empíricas y la teoría se somete a exámenes más y más rigurosos y difíciles, saliendo airosa de ellos. Sin embargo, la cuestión de fondo radica en lo que llamamos “razón explicativa” pues lo que hacemos es que si la teoría –o sus leyes y modelos– es fácilmente comprensible, intuitiva y altamente manejable, de tal suerte que su normatividad impone relaciones claras y simples entre variables y vincula unívocamente las etapas antecedente y consecuente de un evento, permitiendo deducir y extrapolar –o intrapolar– el comportamiento del sistema, entonces decimos que la teoría da razón del por qué de las cosas, es decir, es explicativa.

Pero hablar del por qué de las cosas de manera tan general es sumamente difícil; de hecho, estoy convencido que en la física –y en general, en las ciencias– hablamos más de los “cómo” que de los “por qué”, pues la realidad observacional puede ser muy distinta de la realidad ‘real’. Y es que la realidad física que abordamos está constreñida a objetos reales que no modifican su constitución material, por lo que la física solamente cubre una pequeña fracción del espectro que constituye la realidad natural. Pretender explicar los porqué del mundo, aun sin ser pretencioso, es bastante complicado. Lo que creo es que la física sí puede dar razón de los sucesos físicos dentro del subconjunto de la realidad que llamamos realidad física, es decir, podemos conocer cómo funciona, y para ello lo hace introduciendo las relaciones causales que, a pesar de que las consideramos como inferencias lógicas que entrelazan los eventos,<sup>55</sup> la mayoría de las veces nos deja entrever el posible funcionamiento natural aunque no nos conduzca al por qué de tal funcionamiento.

Y es que en realidad, cuando estudiamos un fenómeno cualesquiera, decimos cómo sucede y argumentamos –o teorizamos– por qué sucede; incluso a veces, justificamos la futura utilidad funcional mediante un para qué. Pero hablar del verdadero ‘por qué’ de la ocurrencia de las cosas es más profundo, pudiendo incluso llegar a relacionarse con el animismo, puesto que esa pregunta está cargada de intencionalidad y trascendencia. En este caso puede ser igualmente significativo justificar el por qué de la ocurrencia de las

---

<sup>55</sup> De hecho, hay que pensar detenidamente si la causalidad es inherente al mundo material o es sólo una consecuencia de nuestras apreciaciones. Tal y como se vio en el capítulo 2, creo que es más fácil explicar las cosas inclinándose por la primera opción que por la segunda.

cosas con la anuencia de Dios o con la fatalidad impuesta por lo inescrutable del destino, o con el azar, con el determinismo o con teorías que empleen ideogramas. A fin de cuentas, el por qué yace oculto en el fondo de la naturaleza y lo que hacemos es deducir causas y efectos, y en eso reside el poder explicativo de una teoría. Por eso la teoría cuántica es, según sus críticos, descriptiva, aunque desde mi punto de vista, es explicativa desde su propio marco de referencia.<sup>56</sup>

Quizá haya sido por ello que Bohr, Heisenberg y Born no se preocuparon por dar explicaciones de índole epistémica y muestran que su trabajo, a pesar de ir contracorriente y no emplear ideogramas o representaciones pictóricas, se adecua con gran precisión a los resultados empíricos, utilizando solamente formulaciones matemáticas. Heisenberg lo dice con toda claridad (al comentar acerca de cómo nació su principio, después de conocer los trabajos de Born y de Pauli, y después de hacer un replanteamiento conceptual novedoso del problema) al decir:

«Si de un paquete de ondas queremos saber tanto su velocidad como su posición, ¿cuál es la máxima precisión que podemos obtener, partiendo del principio de que en la naturaleza sólo se dan aquellas situaciones que cabe representar en el esquema matemático de la mecánica cuántica?» La tarea matemática era muy sencilla y el resultado fue el principio de incertidumbre, que parecía ser compatible con la situación experimental.<sup>57</sup>

Sin embargo, el problema explicativo subsiste pues, aun cuando se han incorporado algunos pictogramas simples que intentan apoyar el formalismo matemático y esclarecer el contenido físico, lo que se tiene es una teoría casi totalmente matemática que resiente, no obstante ser altamente predictiva y notoriamente precisa, la ausencia de imágenes esclarecedoras e ilustrativas propias del clasicismo físico (la representación ideográfica que posibilita la comprensión del fenómeno). De hecho, de Broglie está de acuerdo con esto cuando expresa que

En otras palabras, para describir las propiedades de un objeto atómico es indispensable, como dice Bohr, hacer uso de sus aspectos contrastantes. La utilización de los aspectos contrastantes y contradictorios se encuentra regida por las relaciones de incertidumbre de Heisenberg. Y, por consiguiente, esas relaciones constituyen el único instrumento matemático de que se sirve Bohr para su

---

<sup>56</sup> Como un buen ejemplo de esto que digo está la obtención de la antimateria en el CERN, pues se “logró por primera vez en el mundo producir durante una décima de segundo 38 átomos de antihidrógeno, el tiempo suficiente para estudiarlos, abriendo así la puerta a la comprensión de las diferencias entre la materia y la antimateria. El hito se logró en el experimento ALPHA del CERN.” (Por primera vez crean y retienen antimateria - El Universal - Ciencia.mht. [www.eluniversal.com.mx.17/Noviembre/2010](http://www.eluniversal.com.mx.17/Noviembre/2010)). No hay que olvidar que la antimateria fue predicha, en 1931, por Dirac.

<sup>57</sup> Heisenberg., *The development...* p. 35

interpretación de de la mecánica cuántica. Esta situación, que se encuentra caracterizada por el empleo conjugado de los aspectos contrastantes, ha sido llamada *complementariedad* por Bohr, y las relaciones de Heisenberg han recibido el nombre de relaciones de complementariedad.<sup>58</sup>

Por otra parte, el problema epistemológico que conlleva PIH se atenúa cuando se conjunta con PCB pues la dualidad onda-partícula de Bohr se torna una muleta imprescindible que asegura la validez de PIH y su inaccesibilidad al conocimiento de los entes subatómicos. Este problema seguirá vigente en tanto no se obtengan datos precisos que nos refieran qué es (o cómo es) el objeto con el que tratamos, dado que sólo tenemos indicios de él por su carácter estadístico.

Y es que PCB declara admisible y legal la dualidad de los objetos del submundo atómico para 'ingresar' a una realidad muy distinta a la macroscópica, realidad que obstinadamente se muestra esquiva e indefinida al experimentador, aun cuando sepa cómo se comportará la entidad, dependiendo del experimento al que se le someta. Tal dualidad es impensable clásicamente, dado que los objetos macroscópicos tienen una existencia real que en nada depende del observador, independientemente de si son sometidos o no a una observación y, cuando se les somete a observación, se muestran como entes separados y de naturaleza bien definida, fácilmente distinguibles por sus propiedades físicas y comportamiento distinto. ¿Cómo es entonces que los objetos cuánticos asumen tal dualidad? ¿No contraviene esto la realidad física? Efectivamente sí. Por eso Bohr salva tal escollo apoyándose en los resultados experimentales y en la enunciación de PCB, PIH e incluso el Principio de correspondencia.

Pero esto está justificado pues al ir reduciendo la magnitud de las dimensiones observacionales, cada vez es más difícil contar con instrumental de medición adecuado que nos permita distinguir claramente cómo son los objetos, lo que seguramente y para dar una explicación del suceso, nos llevaría a introducir nuevos conceptos teóricos. Como ejemplo, al examinar el comportamiento de un gas, fue necesario proponer como indispensables un conjunto de hipótesis razonables de carácter microscópico que posibilitaran explicar el comportamiento a nivel macroscópico, con su respectiva modificación de las variables de estado; es decir, se introdujo el concepto de moléculas (puntuales), entidades diminutas que no son mensurables ni son sugeridas por nuestros sentidos. Al variar la energía cinética de las moléculas, se afectan las variables macroscópicas: temperatura, presión y volumen, por mencionar algunas, alterándose el

---

<sup>58</sup> de Broglie., *Examen de la mecánica...* pp. S<sub>29</sub>– 246-247.

estado del sistema. Igualmente fue complicado encontrar –inicialmente– una causa del por qué se presentan fenómenos de capilaridad en los fluidos, o el por qué de la transferencia del calor o del movimiento browniano. Todos estos casos enfrentaron problemas que tuvieron que ser resueltos mediante hipótesis razonables, hipótesis a las que se les atribuyó significancia física real, y que posteriormente fueron validadas mediante el modelaje de la física clásica.

Sin embargo, las dimensiones involucradas en los casos anteriores son de mayor magnitud que aquéllas del mundo cuántico.<sup>59</sup> Entonces ¿cómo asegurar si los objetos atómicos son partículas? ¿u ondas? Bohr entrevió este problema, y encontró que la manera de salir de tal atolladero era proponiendo un principio que validara la fusión de ambas entidades clásicas en una entidad única, sacrificando la idea de la objetividad clásica, puesto que, al ignorar fehacientemente si los objetos atómicos tienen rasgos físicos únicos y bien definidos tanto en tiempo como en espacio, y al hacerlos coexistir simultáneamente, se contravenía flagrantemente uno de los requisitos de la objetividad: el de las entidades separadas, independientemente del marco de referencia en que se sitúe el observador. Con ello, el objetivismo en la mecánica cuántica desaparece, lo que ocasionó que PCB tuviera que apuntalar a PIH y a su vez, sostenerse en él. Estos dos principios modifican entonces la visión que se tiene de la realidad pues logran que, al menos a nivel cuántico, la dualidad adquiriera “existencia real” (igual que ocurrió con la luz), y sea tan viable como la “realidad” macroscópica. El apoyo mutuo que se brindan estos dos principios es insoslayable y vuelven más accesible la teoría, haciéndola más comprensible y amigable, pues logran –por decreto– que coexistan simultáneamente dos entidades tradicionalmente irreconciliables, suavizando así la imagen de una teoría a la que se juzga de circunscribirse a ser un algoritmo matemático con fines predictivos, pero con nula capacidad explicativa. Bohr apuntala entonces PCB con las relaciones de incertidumbre de Heisenberg, pues según éstas y para los estados cuánticos, la predicción en las mediciones de una variable conjugada debe ser incierta estadísticamente.

Podríamos decir que PIH y PCB favorecen la descripción y proporcionan resultados certeros, aunque no por eso dejan de obnubilar la capacidad de conocer el mundo

---

<sup>59</sup> Por ejemplo, el radio medio de una molécula simple es de  $\approx 10^{-10}$  m, mientras que el radio efectivo de un protón es, aproximadamente, de  $10^{-15}$  m, y en el caso de un electrón debe ser menor. Es decir, una molécula es 5 órdenes de magnitud mayor respecto del protón. En el caso del electrón es más drástico todavía, casi como querer comparar la estatura de una persona ( $10^0$  m) con el radio de la tierra ( $\approx 10^6$  m).

subatómico: PIH impide medir con precisión las variables que nos permitirían abordar la realidad cuántica, y PCB obstaculiza el conocimiento de qué tipo de objeto enfrentamos; en consecuencia, dado que no podemos medir, tampoco podemos abordar la realidad cuántica. Dicho de otra manera: según la teoría cuántica, estamos impedidos a conocer la realidad, por lo que sólo nos resta imponer una normatividad lógica a los fenómenos que estudiamos, buscando evitar las contradicciones internas. Pero al decretarse la existencia de la dualidad, es obvio que no hay contradicción, sino que solamente tenemos una manera alternativa de abordar la realidad externa, digna de matematizarse. Heisenberg lo dice apropiadamente, pues

Bohr's concept of complementarity resulted in the same restrictions to the applicability of classical concepts, swing to the appearance of quite different simple pictures which were "complementary", and which could co-exist without contradiction only if their range of application was restricted. Some time later, Bohr's view of complementarity found another, very impressive representation in the mathematical scheme of the quantum theory, when Jordan, Klein and Wigner were able to show that, starting from a simple (three-dimensional) theory of material waves in Schrödinger's sense, one could quantize this theory and so come back to the Hilbert space of quantum mechanics. The complete equivalence of the particle and wave pictures in the quantum theory of matter had found its rigorous basis. The Pauli exclusion principle and the Bose statistics thereby also achieved their proper place in quantum theory.<sup>60</sup>

Queda de manifiesto entonces que Heisenberg y Bohr proponen elegantemente, con sus principios, salidas laterales –tal como hicieran antes Einstein y Planck– al entrapamiento cuántico existente debido al uso de los conceptos clásicos, buscando unificar las muchas y variopintas explicaciones a los experimentos. Ambos físicos proceden de la misma manera al poner en entredicho la representación pictórica, sólo que de distinta manera: mientras Heisenberg desea crear nuevos conceptos *ad hoc* a la fenomenología cuántica, Bohr opta por mantener la terminología clásica, adecuándola a las nuevas necesidades. Las razones son de mucho peso: para Heisenberg, los fenómenos son nuevos y la matematización es, en sí misma, lo suficientemente explícita para dar una descripción de la ocurrencia de los eventos, pero para Bohr los conceptos clásicos deben mantenerse porque si bien la matemática es imprescindible en el modelaje, son los conceptos quienes dotan de significancia la abstracción (el modelaje) que se hace del acontecer natural, estableciéndose con ello la circularidad habitual de la física clásica: realidad → modelo → matematización → realidad. Estas son las versiones de ambos científicos:

---

<sup>60</sup> Heisenberg., *The development...* p. 21.

The new development [of quantum theory] was commenced in a fundamental paper by Heisenberg, where he succeeded in emancipating himself completely from the classical concept of motion by replacing from the very start the ordinary kinematical and mechanical quantities by symbols which refer directly to the individual processes demanded by [Planck's] quantum postulate.<sup>61</sup>

Y

Although Bohr believed that quantum mechanics should be interpreted through classical physics, among the founders of the theory he seems to have been unique in his lack of appreciation of the problem of deriving classical physics from quantum theory.<sup>62</sup>

Sobra decir que la propuesta de Bohr le valió un sinfín de críticas. Aun así, Bohr sostiene su postura, pues para él los conceptos clásicos son los que tienen “contenido intuitivo”;<sup>63</sup> lo que hace Bohr es más bien acotar el rango de validez de las leyes clásicas, aduciendo que es inútil aplicarlas al acontecer atómico,<sup>64</sup> por tal motivo, propone introducir una visión más amplia y descriptiva expresada por leyes matemáticas y sustentada en los postulados de la teoría cuántica –con lo que esta teoría tendría un carácter más general que la física clásica–, apoyada en la enorme trascendencia teórico-experimental del principio de indeterminación, al decir

A new epoch in physical science was inaugurated, however, by Planck's discovery of the elementary quantum of action, which revealed a feature of wholeness inherent in atomic processes, going far beyond the ancient idea of the limited divisibility of matter. Indeed, it became clear that the pictorial description of classical physical theories represents an idealization valid only for phenomena in the analysis of which all actions involved are sufficiently large to permit the neglect of the quantum. While this condition is amply fulfilled in phenomena on the ordinary scale, we meet in experimental evidence concerning atomic particles with regularities of a novel type, incompatible with deterministic analysis. These quantal laws determine the peculiar stability and reactions of atomic systems, and are thus ultimately responsible for the properties of matter on which our means of observation depend. The problem with which physicists were confronted therefore to develop a rational generalization of classical physics, which would permit the harmonious incorporation of the quantum of action. After a preliminary exploration of the experimental evidence by more primitive methods, this difficult task was eventually accomplished by the introduction of appropriate mathematical abstractions. Thus, in the quantal formalism, the quantities by which the state of a physical system is ordinarily defined are

---

<sup>61</sup> Plotnitsky., *Reading Bohr...* p. 22.

<sup>62</sup> Butterfield, J. & Earman, J. (2007).pdf: *Philosophy of Physics, Part A*; Elsevier B. V.; U. K. 2007. Adobe Read. p 418.

<sup>63</sup> Cadenas, G. Y. (2004).pdf: *Epistemología, Ontología y Complementariedad en Niels Bohr*; Tesis doctoral; Facultad de Filosofía; Universidad Complutense de Madrid. p. 103.

<sup>64</sup> Esto se relaciona con el Principio de Correspondencia, ya que según establece Bohr: “en el límite clásico, las probabilidades cuánticas deben de convertirse en certidumbres; las fluctuaciones resultan despreciables. O sea que en el límite clásico las predicciones de las leyes cuánticas deben de estar en correspondencia de uno a uno con las predicciones clásicas”. (Saxon., *Elementary Quantum...* p. 16).

replaced by symbolic operators subjected to a non-commutative algorithm involving Planck's constant. This procedure prevents a fixation of such quantities to the extent which would be required for the deterministic description of classical physics, but allows us to determinate their spectral distribution as revealed by evidence about atomic processes. In conformity with the non-pictorial character of the formalism, its physical interpretation finds expression in laws, of an essentially statistical type, pertaining to observations obtained under given experimental conditions.<sup>65</sup>

### 5.3 El azar y el proceso de medida

En la física siempre está presente que al llevar a cabo un proceso de medición<sup>66</sup> y recolectar un conjunto de datos con valores aproximadamente iguales, estos datos pueden ser de tendencia central que indican dónde se encuentra el valor esperado de la medición, y que este proceso conlleva, inevitablemente, una incertidumbre (o error experimental),<sup>67</sup> asociada al proceso de medida.<sup>68</sup> PIH se refiere, en parte, a una incertidumbre de este tipo pero su deducción, más que deberse a la teoría de errores y su énfasis en la precisión del instrumento de medida, es una consecuencia inmediata de la no conmutatividad de los operadores<sup>69</sup> asignados a los observables, ya que

---

<sup>65</sup> *Quantum Physics and Philosophy*, en Bohr, N. (1963): *Essays 1958-1962 on Atomic Physics and Human Knowledge*; Interscience Publishers (Richard Clay and Company, Ltd.). G. B. 1963. pp. 18-19

<sup>66</sup> La medición, que es la cuantificación de nuestra experiencia, se basa en la proceso de comparación con alguna cantidad de referencia a la que llamamos unidad estándar o unidad patrón.

<sup>67</sup> Formalmente decimos que para estimar la incertidumbre ( $\Delta$ ) de una medida, debemos determinar el valor promedio del conjunto y calcular un promedio de las discrepancias o *desviaciones* de todas las medidas. Puesto que el promedio de las desviaciones es cero, lo más razonable es calcular el promedio del cuadrado de las desviaciones. Así, la suma de los cuadrados de las desviaciones divididas por el número de observaciones será una medida de qué tan dispersos se encuentran los valores del conjunto. Si este promedio del cuadrado de las desviaciones es muy pequeño, significa que todos los valores difieren poco del valor promedio, en consecuencia, la incertidumbre es pequeña; por el contrario, si los valores difieren mucho, los valores se encuentran muy dispersos y la incertidumbre es grande. La estadística le ha dado el nombre de *varianza* al promedio del cuadrado de las desviaciones, y a su raíz cuadrada, el de *desviación típica o desviación estándar*. **Esta última representa la incertidumbre en una medida** calculada a partir de un conjunto de ellas.

<sup>68</sup> Podemos decir que la *observación* consiste en el examen cuidadoso (y crítico) de un fenómeno, donde el observador identifica, mide y analiza los diversos factores y circunstancias que influyen en dicho fenómeno; la *experimentación* en cambio, no es más que la observación de un fenómeno en condiciones cuidadosamente controladas (previamente organizadas y planeadas) que permiten al experimentador ver la forma en que éstas afectan al proceso.

<sup>69</sup> Decimos que los operadores  $p$  y  $q$  conmutan si se satisface que  $qp - pq = 0$ . (Esto se satisface nada más para el caso clásico, dado que  $\hbar$  resulta ser despreciable respecto a las cantidades macroscópicas). La no conmutatividad de los operadores representa que los observables son incompatibles entre sí, debido a que no comparten eigenfunciones, es decir, los observables incompatibles no tienen eigenfunciones comunes entre sí, pues carecen de un conjunto completo de eigenfunciones. (Decimos que un subconjunto  $S \in E$  ( $E =$  espacio normado) es completo si, para toda sucesión de Cauchy  $\{x_n\}$  de elementos  $x_n \in S$ , existe un elemento  $x$  de  $S$  tal que  $\lim_{n \rightarrow \infty} \|x - x_n\| = 0$ ). (Ver: Nieto, S. J. I. (1978): *Introducción a los Espacios de Hilbert*; Monografía No. 19, Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico. OEA. 1978. p. 47). En el mismo texto (pp. 49-52) se puede encontrar la demostración de la completitud del espacio  $L_2$  –espacio de

$$qp - pq \equiv [q, p] = \frac{\hbar}{i} \text{-----} (3)$$

La expresión anterior se denomina **relación canónica de conmutación**, y suele abreviarse como:

$$[q_i, p_j] = -i\delta_{ij}\hbar, \quad i, j = x, y, z \text{-----} (4)$$

donde:  $\delta :=$  delta de Kronecker ( $\delta = 0$  si:  $i \neq j$ ,  $\delta = 1$  si:  $i = j$ ),  $q :=$  operador de posición (por ejemplo) y  $p :=$  operador de momento lineal (por ejemplo), ambos operadores en un espacio de Hilbert, donde  $p$  y  $q$  son matrices, con lo que resulta evidente la no conmutatividad de los operadores, y la comparecencia del cuanto de acción en los resultados cuánticos muestra que la constante de Planck,  $h$ , no sólo es la “medida” de la no conmutatividad de los operadores, sino que también se arroga el derecho de exclusión de las variables y se erige en un valladar insalvable para obtener valores únicos y precisos de las variables involucradas en la medición, al exhibir cómo se relacionan los instrumentos de medida con las entidades microscópicas, fenómeno que no se detecta a nivel macroscópico; de hecho, Bohr aduce, al referirse a PIH que

These circumstances find quantitative expression in Heisenberg’ indeterminacy relations which specify the reciprocal latitude for the fixation, in quantum mechanics, of kinematical and dynamical variables required for the definition of the state of a system in classical mechanics. In fact, the limited commutability of the symbols by which such variables are represented in the quantal formalism corresponds to the mutual exclusion of the experimental arrangements required for their unambiguous definition. In this context, we are of course not concerned with a restriction as to the accuracy of measurements, but with a limitation of the well-defined application of space-time concepts and dynamical conservation laws, entailed by the necessary distinction between measuring instruments and atomic objects.<sup>70</sup>

Así entonces, es la no conmutatividad de los operadores asociados a los observables una de las causales que impiden determinar unívocamente el estado de movimiento del sistema en un tiempo dado, permitiendo con ello que la probabilidad sea la única opción para hacerlo, es decir, en vez de tener una descripción cierta del estado del sistema, tal

---

funciones cuadrado integrable (espacio vectorial con producto interno– que es como aparece la función de onda en la mecánica cuántica al expresarse como función de densidad probabilista–. Una manera más sencilla de comprender esto es que la no conmutatividad de los operadores implica la ruptura –según el teorema de Noether, (ver §2.3)– en la simetría del espacio y la conservación de la cantidad de movimiento lineal (o la energía). De ahí la no conmutatividad en las variables cinemáticas y dinámicas.

<sup>70</sup> *Quantum Physics and Philosophy. Causality and Complementarity. 1958*; en: *Bohr: Essays 1958-1962 on...* p. 21.

como se hace clásicamente, sólo podemos tener acceso a una descripción probable, lo que representa un obstáculo para ‘explicar’ la evolución del objeto de estudio. PIH se asume con ello en uno de los principios cuánticos que le otorgan, tal como vimos antes, existencia “natural” a la probabilidad y al azar, orillándonos con ello a renunciar a un mundo determinista laplaciano; esto puede manifestarse más propiamente como

One of the reasons that the canonical commutation relations are so important is that they give rise, directly, to the uncertainty relations. Recall that if two bounded operators do not commute, then there are eigenvectors of one that are not eigenvectors of the other [...] It follows that there are states that assign trivial probabilities to the possible values of one observable (i. e., probability 1 for one eigenvalue, and 0 for the others), and non-trivial (not 0 or 1) to at least two possible values of the other. Hence non-commutativity already implies a type of ‘uncertainty relation’: certainty about the value of one observable can imply uncertainty about the value of another.<sup>71</sup>

Resulta entonces claro que PIH, al ser una consecuencia directa de la no conmutatividad de los observables<sup>72</sup> y de la interpretación estadística de la función de onda  $\Psi(x, t)$ ,<sup>73</sup> impide con ellos una descripción determinista clásica satisfactoria del acontecer cuántico, pues restringe la información que podamos allegarnos de las variables implicadas en el experimento, imponiendo un principio de exclusión de suma gravedad, ya que entre más sepamos de una de ellas, más ignoramos de la otra (vea la figura 5.1), restricción que se satisface aun para instrumentos ideales (incertidumbre cero); es indudable entonces que la restricción que PIH impone al manejo simultáneo en las incertidumbres de las variables es sumamente poderosa, pues la relación que establece entre ellas inhibe el conocimiento pleno de ambas –cosa que no hace la teoría

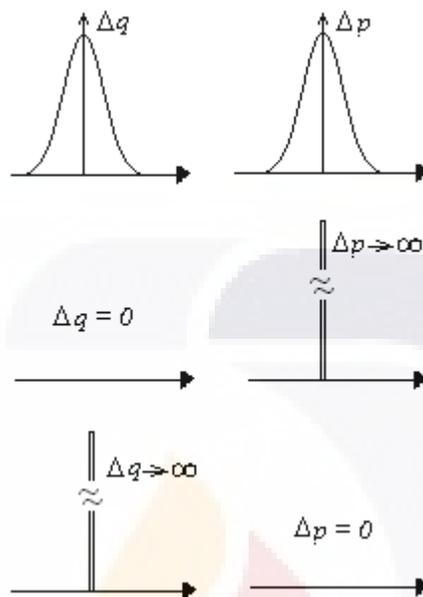
---

<sup>71</sup> Dickson, M. (2007): *Non-Relativistic Quantum Mechanics*, en *Philosophy of Physics, Part A. Handbook of the Philosophy of Science*. Edited by Butterfield, J. & Earman, J. Elsevier, North-Holland.UK. 2007. pp. 341-342. También aquí se encuentra, en la página 343, una sencilla deducción, conocida como ‘deducción algebraica’ de PIH.

<sup>72</sup> En este caso decimos que –y de acuerdo al teorema de Noether– la simetría entre los operadores del espacio ( $x$ ) y la cantidad de movimiento ( $\vec{p}$ ), conlleva la conservación de esta última; esta conservación se manifiesta por la invariancia traslacional del lagrangiano.

<sup>73</sup> Esto puede verse en el capítulo 3, donde se dijo que la función de onda proporciona toda la información de un sistema en un instante dado. Aquí podemos expresarlo brevemente (aunque más formalmente) pues si se mide un observable, digamos,  $Q(x, p)$  para una partícula en el estado  $\Psi(x, t)$ , podemos obtener uno de los eigenvalores del operador hermítico:  $\hat{Q}\left(x, -i\hbar \frac{d}{dx}\right)$ . En el caso de que su espectro (de  $\hat{Q}$ ) sea discreto, la probabilidad de hallar un eigenvalor particular  $q_n$  asociado con la eigenfunción normalizada es:  $|c_n|^2$ , con  $c_n = \langle f_n | \Psi \rangle$ ; en cambio, si el espectro es continuo, con eigenvalores reales  $q(z)$  y eigenfunciones asociadas (ortonormalizadas) de Dirac:  $f_z(x)$ , la probabilidad de hallar un resultado en el rango  $z$  y  $z + dz$  está dado por:  $|c(z)|^2 dz$ , con  $c(z) = \langle f_z | \Psi \rangle$ , teniendo en mente que en las mediciones la función de onda colapsa a los eigenvalores correspondientes.

de errores– independientemente de la instrumentación empleada, su precisión y su consecuente error de escala.<sup>74</sup>



**Figura 5.1.** Representación gráfica de las incertidumbres de:  $\Delta q \Delta p \approx \hbar$ . En el primer caso, tenemos variables conjugadas con incertidumbres  $\Delta q$  y  $\Delta p$ , no nulas ambas. En el segundo y tercer casos se ve como al disminuir la incertidumbre de una variable (de  $q$  y  $p$ , respectivamente) la incertidumbre de la variable conjugada aumenta considerablemente.

Dado que PIH manifiesta un carácter probabilista, es natural pensar que debe ser factible ilustrar su carácter estadístico y relacionarlo de algún modo con la teoría de errores,<sup>75</sup> cosa que efectivamente ocurre pues al sustituir la desviación estándar ( $\sigma$ ) por la incertidumbre de la medición ( $\Delta$ ) y manejar la normatividad cuántica, se llega a un resultado asombroso, dado por:<sup>76</sup>

<sup>74</sup> El error de escala o incertidumbre en la lectura se define como:  $\Delta E = \pm (1/2)P$ , donde  $P$  = precisión del instrumento, que no es más que la mínima lectura que se puede hacer con él (con el instrumento).  $\Delta E$  nos proporciona la confiabilidad del instrumento de medida, pues entre menor sea  $P$ , menor será  $\Delta E$ . Cuando se habla de un conjunto de datos, entonces hacemos que  $\Delta E = \sigma$ , representando en este caso “la calidad” del proceso de medición.

<sup>75</sup> Esto es porque el paquete de ondas de incertidumbre mínima es una gaussiana, de ahí que se pueda asociar a su desviación estándar con la incertidumbre. Esto es demostrable.

<sup>76</sup> Esto puede hacerse dado que:  $\sigma_A^2 = (\Delta A)^2 = \langle (\hat{A} - \langle A \rangle) \Psi | (\hat{A} - \langle A \rangle) \Psi \rangle = \langle (A - \langle A \rangle)^2 \rangle = \langle A^2 \rangle - \langle A \rangle^2$ .

$$\sigma_q^2 \sigma_p^2 \geq \frac{\hbar^2}{4},$$

lo que implica que

$$\sigma_q \sigma_p \geq \frac{\hbar}{2} \text{----- (5)}$$

que no es más que la expresión (1), considerando que  $\sigma_q$  y  $\sigma_p$  son pequeños, comparados con las variables mismas (es decir:  $\sigma_q < q$ , y  $\sigma_p < p$ ), además de que se establece una relación óptima entre las incertidumbres pues el cuanto de acción se convierte en la máxima cota inferior de las mediciones.

Le teoría de errores y el principio de indeterminación resultan ser consanguíneos porque emplean el mismo lenguaje y la misma simbología como una manera de transmitir resultados y conceptos; sin embargo, su linaje es diferente pues mientras la teoría de errores se fundamenta en el concepto de diferencial de una función, la mecánica cuántica se basa en la interpretación probabilista de la función de onda. En la teoría de errores, al tener una función de varias variables se encuentra que el error neto está dado por la variación que experimenta la variable dependiente cuando las variables independientes sufren un cambio. En el caso del producto de dos variables independientes cualesquiera, digamos  $x$  y  $y$ , según este análisis (de errores) tendríamos que si:

$$z = f(x,y),$$

donde  $z$  es de la forma:

$$z = xy,$$

entonces,<sup>77</sup> al tomar la diferencial obtendremos, en términos de las incertidumbres relativas:<sup>78</sup>

La demostración completa de esto puede hallarse en los libros citados en la página 216, además de encontrarse en: Saxon., *Elementary Quantum...* pp. 106-110.

<sup>77</sup> La función  $z$  la considero como un producto puesto que PIH maneja el producto de las incertidumbres. De hecho, se debe utilizar el caso general de productos y potencias dado por:  $z = x^a y^b$ , donde  $a$  y  $b$  son números reales. El caso que expongo es un caso particular, donde:  $a=b=1$ .

<sup>78</sup> La incertidumbre suele dividirse en una incertidumbre absoluta y una relativa. La incertidumbre absoluta nos proporciona los límites (o el intervalo) dentro de los que se encuentra el valor deseado, indicándonos cuál es el valor central (del intervalo); así, si la longitud de una mesa se encuentra entre 201 y 202 cm, decimos

$$\frac{\Delta z}{z} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y} \text{----- (6)}$$

que muestra claramente que la incertidumbre relativa del producto de dos variables es la suma de las incertidumbres relativas, y claramente, el resultado es muy distinto del que aparece en la ecuación (1). El resultado es igualmente distinto al considerar la desviación estándar de acuerdo al manejo tradicional del análisis estadístico,<sup>79</sup> pues si:

$$\delta z = \frac{\partial z}{\partial x} \delta x + \frac{\partial z}{\partial y} \delta y \text{----- (7)}$$

y considerando que  $\delta x$  y  $\delta y$  son variaciones independientes (es decir:  $\sum(\delta x \delta y) = 0$ ), en general se tiene que:

$$\sigma_z = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2} \text{----- (7')}$$

y en nuestro caso, dado que  $z = xy$ , la desviación estándar del producto de dos variables quedaría entonces como

$$\sigma_z = \sqrt{y^2 \sigma_x^2 + x^2 \sigma_y^2} \text{----- (7'')}$$

o en términos relativos:

$$\frac{\sigma_z}{z} = \sqrt{\frac{\sigma_x^2}{x^2} + \frac{\sigma_y^2}{y^2}} \text{----- (8)}$$

Las ecuaciones (7) y (8) muestran con toda nitidez ser distintas de la expresión (1), siendo evidente que PIH jamás podría obtenerse de la teoría de errores usual, quedando

que su longitud es de  $201.5 \pm 0.5$ , cm, con 201.5 cm siendo el valor central, aun cuando tal cantidad es “incierto”, por no estar contemplada en el instrumento de medida. Para subsanar tal detalle y darle significancia a la incertidumbre –es decir, hacerla “realista”–, se define la **incertidumbre relativa** =  $\frac{\text{incertidumbre absoluta}}{\text{valor medido}}$ , y comúnmente, se expresa en términos porcentuales.

<sup>79</sup> Aquí expreso, sin pérdida de generalidad, la desviación estándar de la muestra, en vez de considerar la desviación estándar del universo; el factor involucrado sería, en todo caso, n-1, en vez de n, con n = número de observaciones de la muestra.

ésta solamente para las incertidumbres a escala macroscópica. La ecuación (8) es la desviación estándar que solemos utilizar en la experimentación cuando, por ejemplo, tenemos parejas de observaciones que proporcionan una variable,  $z$ , cuyos datos se obtienen por repetición bajo condiciones de experimentación idénticas (por ejemplo, en la Ley de Ohm, si se desea encontrar la resistencia  $R$ , conociendo el voltaje  $V$  y la corriente  $I$ , donde  $R = V/I$ ).

En esta expresión (ecuación (8)), usada a nivel clásico, decimos que si las desviaciones estándar tienen un grado de confiabilidad aceptable, nos conducen a una incertidumbre probable del resultado que posee verdadera importancia cuantitativa, pero que es manipulable en el diseño de un experimento, pues nos indica donde queda el valor probable. Por el contrario, y tal como se mencionó líneas arriba, la ecuación (1) proviene de un resultado teórico, al derivarse del carácter estadístico-probabilista de la función de onda  $\Psi$  y del postulado de de Broglie. Y puesto que sabemos que la función de onda es quien contiene –y provee– la información requerida para conocer el estado de movimiento de la partícula (concentrando y transfiriendo la información en términos probabilísticos ( $P(x, t)dx = |\Psi(x, t)|^2 dx$ ), amén de determinar qué propiedades son observables –aun cuando nada más se les asigne un valor probable–) entonces, al hablar de tal onda de probabilidad se evidencia la imposibilidad de fijar, al mismo tiempo, la posición y el momento lineal de una partícula (que es lo que nos dice la expresión (1)), pues la multicada onda asigna a cada punto del espacio-tiempo tan sólo una probabilidad de que la partícula se localice en la posición buscada en el instante determinado, lo que nos remite al hecho de que no es posible hablar de una trayectoria en el sentido clásico, es decir:

debemos esperar que la descripción del sistema cuántico que haremos con ayuda de la ecuación de Schrödinger resulte incompleta, al menos porque sólo podremos describir con ella el comportamiento estadístico del sistema, pero no nos permitirá, por ejemplo, describir con detalle la trayectoria de uno cualquiera de los electrones del ensemble. [...] Sin embargo, se considera que la descripción aportada por la ecuación de Schrödinger es *estadísticamente completa*, es decir, es la descripción estadística más completa posible que el conocimiento contemporáneo permite. Una forma alternativa y conveniente de decir lo anterior es la siguiente. La ecuación de onda describe resultados *reproducibles*, pero la trayectoria de un electrón no es reproducible. Luego, la ecuación de Schrödinger no describe el comportamiento de un electrón, sino sólo el de un ensemble de electrones similarmente preparados, cuyo comportamiento estadístico es perfectamente reproducible.<sup>80, 81</sup>

---

<sup>80</sup> De la Peña., *Introducción a la...* p. 39.

<sup>81</sup> El término ensemble es un vocablo que a veces aparece en la mecánica estadística; de la Peña utiliza tal palabra y dice que es “una colección hipotética infinitamente grande de réplicas del sistema físico, cada una

Por lo anteriormente dicho, es fácilmente comprensible que el carácter estadístico atribuido a PIH mantiene rasgos esencialmente distintos de aquellos que manejamos en la experimentación habitual clásica, ocasionando con ello que sólo sea probable localizar el objeto atómico en una región cualesquiera y anulando la posibilidad de hacerlo con la precisión deseada; a tal región de localización probable se la ha denominado “región de dispersión”.<sup>82</sup>

Por otra parte, reiteradamente hemos dicho que las variables que aparecen en la ecuación (1) son canónicamente conjugadas y que son requeridas por la física clásica para dar una descripción completa del sistema. Dichas variables son cantidades relativas a los aspectos geométricos y cinéticos de la materia, proporcionando aquéllas el estado del movimiento del sistema respecto de un referencial espacial, mientras que las variables cinéticas nos dan la mutabilidad (temporal) del cuerpo, permitiéndonos construir una imagen clara de su comportamiento; incluso, la dependencia funcional de una multitud de variables de tales parámetros fundamentales en distintas áreas de la física clásica da lugar a los espacios fase (de ahí la postura laplaciana, en la que es posible visualizar tanto la trayectoria<sup>83</sup> como la evolución del evento que permiten la predicción-retrodicción del sistema).

---

de las cuales se encuentra en uno de los posibles estados dinámicos del sistema, consistentes con las condiciones del problema (hamiltoniano, condiciones de frontera, etc.) [...] Un ensemble sólo se puede realizar físicamente en forma aproximada, mediante la ejecución de un gran número de experimentos similares independientes.”(*Ibid.*, p. 38, en un pie de página). Igualmente, asegura que su uso dentro de la teoría cuántica hace que la interpretación de la función de onda,  $\Psi$ , sea más “realista [...] y objetiva en cuanto que se considera que  $\Psi$  describe un sistema materia que existe con independencia de nosotros y de nuestras experiencias sensoriales, y que tiene la propiedad objetiva, propia de él, de encontrarse en el estado  $\Psi$ , independientemente de nuestro conocimiento o desconocimiento de ello” (*Ibid.*, p. 876).

<sup>82</sup> Puede verse fácilmente al considerar un estado estacionario continuo y suponiendo que el potencial  $V$  –que aparece en la ecuación diferencial de Schrödinger–, se anula en infinito. Con ello, la función de estado obtenida es la de una partícula libre que comprende tanto eigenfunciones del momento lineal (para la onda incidente) como de momento angular orbital para la onda dispersada en la región de interés (que tiene que ver con la sección eficaz o transversal de dispersión de Rutherford). Es posible mostrar entonces que el término de interferencia cuántica (asociada a las ondas) oscila rápidamente al acercarnos al límite clásico (cuando  $h \rightarrow 0$ ) por lo que decimos que si la energía o el ángulo de observación se distribuyen en una cantidad infinitesimal, el promedio asociado con la dispersión coulombiana –que es la dispersión de cargas puntuales– y su consecuente probabilidad, tienden a desaparecer, resultando con ello en un inobservable.

<sup>83</sup> Recordemos que clásicamente puede decirse que una trayectoria es una curva que evoluciona de determinada manera con el tiempo, lo cual está en franca contraposición con la función de estado  $\Psi$ , que tiene como dominio todo el espacio y el tiempo, implicando con ello que es una entidad no localizable. Por eso, para describir una trayectoria cualesquiera, se selecciona una función particular y localizada (la habitual es aquella que se anula en todas partes, excepto en una vecindad infinitesimal de la trayectoria –el paquete de ondas–).

Pero PIH, al conjuntar simultáneamente las variables conjugadas y ligarlas con el cuanto de acción y su carácter de exclusión, erradica totalmente el conocimiento exacto y completo del comportamiento del sistema, tanto en tiempo como en espacio, pues la precisión (simultánea) de ambas variables se halla teóricamente acotada, lo que implica que conocer una de ellas en su totalidad impide, obligadamente, el conocimiento de la otra. Esto en la física aparece habitualmente como

En un experimento real, ¿se pueden determinar la posición y el impulso de la materia o la radiación, en el mismo instante? La respuesta que se obtiene de la teoría cuántica, es: no más exactamente que lo permitido por el Principio de Incertidumbre de Heisenberg. Existen dos partes de este principio, también llamado principio de indeterminación. La primera parte implica la medición simultánea de la posición y el impulso. Afirma que en un experimento no se puede determinar simultáneamente el valor exacto de una componente del impulso, es decir,  $p_x$ , de una partícula y también el valor exacto de la coordenada correspondiente  $x$ . Por otro lado, la precisión en la medición estará inherentemente limitada por el proceso de medida en sí [...]<sup>84</sup>

Ahora bien, ¿cómo se justifica esto físicamente?, es decir, ¿cómo “sabe” un instrumento cuándo está interactuando con objetos microscópicos que limitan la medición? En realidad, tanto el instrumento como el objeto atómico “desconocen” con quien interactúan, a menos que tengan consciencia, pero si consideramos el objeto cuántico como nuestro sistema, y quizá por alguna propiedad semejante a una inercia pequeñísima, el objeto reacciona prontamente ante su interacción con el instrumento de medida, modificando así sus cantidades físicas, que es lo que propone PIH. Bohr lo ejemplifica estupendamente al decir

Se propone medir, tan exactamente como sea posible, la posición de una partícula “puntual” como un electrón. Para mayor precisión, se utiliza un microscopio para observar el electrón [...] Para poder ver al electrón, es necesario iluminarlo, ya que lo que ve el observador, son los fotones de la luz dispersados por el electrón. En este punto, aún si hacer cálculo alguno, se puede ver cómo aparece el principio de incertidumbre. El propio acto de observar al electrón lo perturba. En el momento de iluminar el electrón, éste retrocede a consecuencia del efecto Compton, de modo tal que, como se verá, no se puede determinar completamente. Sin embargo, si el electrón no está iluminado, no puede ser observado (detectado). Por lo tanto, el principio de incertidumbre se refiere al proceso mismo de medición y expresa el hecho de que siempre existe una interacción indeterminada entre el observador y lo observado; no existe nada que pueda hacerse para evitar esta interacción o para compensarla por adelantado.<sup>85</sup>

Pero tal interacción siempre ha estado presente a la hora de efectuar cualquier medición, aunque dependa del tamaño del sistema a medir; a nivel macroscópico la

---

<sup>84</sup> Eisberg-Resnick., *op. cit.*, p. 91.

<sup>85</sup> Eisberg-Resnick. pp. 92-93.

interacción instrumento-sistema no importa mucho, pero entre menor sea el tamaño del objeto, adquieren mayor relevancia tanto el instrumento como el proceso de medida. Por ejemplo, para medir la corriente eléctrica a través de una resistencia eléctrica de determinado valor se usa el amperímetro, instrumento de resistencia (eléctrica) interna muy pequeña, muy cercana a cero, que se coloca en serie con la resistencia. La resistencia interna del amperímetro no perturba la medición pues la corriente eléctrica pasa a través del instrumento sin encontrar, prácticamente, oposición alguna; así, decimos que el amperímetro “es visto” por la carga eléctrica en movimiento –la corriente eléctrica– como un alambre, y el instrumento no influye o altera la medida, pues la lectura no ha sufrido variaciones o desviaciones importantes del valor esperado –y predicho por la Ley de Ohm:  $V = IR$ –.<sup>86</sup>

En términos generales, siempre que realizamos una medición exigimos que el instrumento de medida sea lo suficientemente fino para no alterar las cantidades dimensionales que se desean medir. En el ejemplo del amperímetro, este instrumento no perturba la corriente eléctrica a través de la resistencia. En el caso cuántico, esto ya es imposible, pues todos los instrumentos de medición que empleamos se basan en emisión-recolección de ondas o partículas pequeñas (átomos, electrones, etc.), lo que implica que, en caso de utilizarlo para medir, por ejemplo, las variables asociadas a un electrón podríamos medir otra cosa. En segundo lugar, y quizá sea el aspecto más relevante, no tenemos instrumental con la suficiente “fineza” para medir magnitudes cuánticas, puesto que las dimensiones del objeto a medir y del instrumento de medición pueden ser comparables, lo que ocasionaría una perturbación en el sistema por cuantificar. En caso de utilizar ondas, habría un intercambio de energía entre instrumento y objeto, invalidando por completo la lectura. La medición es, bajo estas restricciones tecnológicas, prácticamente imposible.

Es por ello que admitimos que a nivel cuántico existe un estrecho vínculo entre el objeto a medir y el instrumento de medida, lo que impide que bajo ningún aspecto sea viable efectuar predicciones deterministas clásicas, encontrando que a lo más que podríamos aspirar es a predecir resultados experimentales probables (relativos) en caso de cualquier observación. Por ello, a nivel cuántico PIH, asume una importancia de

---

<sup>86</sup> En este caso, el error porcentual de la medición estaría dado por (5), teniéndose:  $\frac{\Delta V}{V} = \left( \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta R}{R} \right) * 100$ , donde cada una de las incertidumbres de las variables está determinada por la precisión del instrumento, dependiendo sólo de su naturaleza (si es analógico o digital). Note la diferencia con lo estipulado por PIH.

inigualable trascendencia pues se erige como un desarrollo teórico excepcional que concuerda completamente con los resultados experimentales, alcanzando el *estatus* de relación fundamental de la naturaleza cuántica; además,

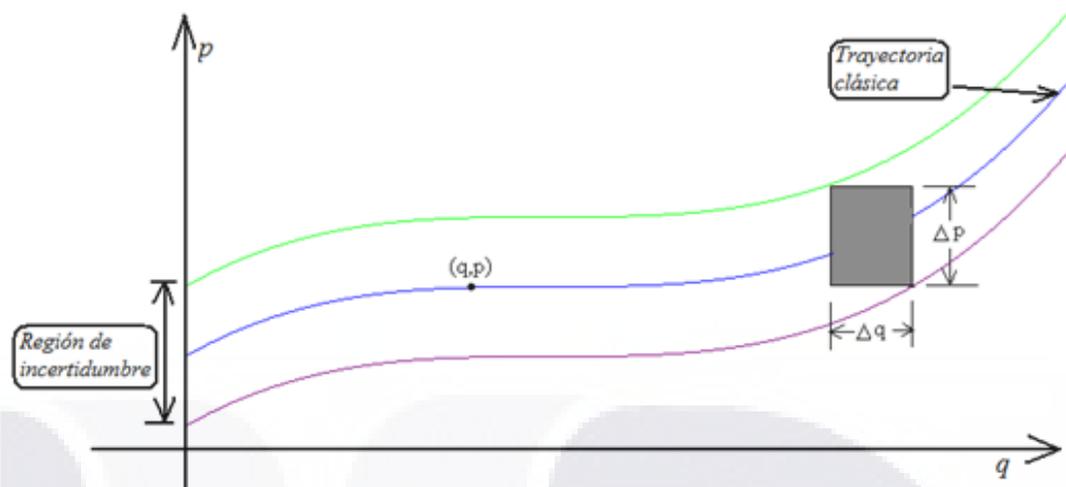
El principio de indeterminación “protege” a la mecánica cuántica. Heisenberg comprendió que, si fuese posible medir simultáneamente el momentum y la posición con una precisión mayor la mecánica cuántica sufriría un colapso. En consecuencia, propuso la mencionada imposibilidad. Luego, muchos tomaron asiento y trataron de imaginar el medio de medir con una mayor precisión la posición y el momentum de cualquier objeto (una pantalla, un electrón, una bola de billar) pero nadie pudo lograrlo. La mecánica cuántica mantiene su existencia peligrosa, pero, correcta aún.<sup>87</sup>

La imposibilidad de definir la trayectoria de un objeto cuántico es perfectamente ilustrada por Alonso y Finn, al mostrar ideográficamente el estado dinámico de una partícula en un espacio fase, y en cualquier instante, contrastando lo que ocurre entre las físicas clásica y cuántica. En la física clásica queda perfectamente definido el estado de una partícula en el punto  $(q,p)$ , en tanto que en la física cuántica el punto representativo del sistema quedaría encerrado en un rectángulo que ilustra la dispersión que hay en una lectura, lo que imposibilita la ubicación del objeto y por tanto, la trayectoria del objeto. Hay que decir también que el rectángulo es de lados tales que se satisface PIH, es decir:  $\Delta q \Delta p \approx h$ .

Es menester observar que en el rectángulo que representa PIH (ideográficamente, equivalente a un rectángulo de área  $h$ ), si un lado se reduce, el otro se incrementa, y no se pueden reducir ambos lados simultáneamente, pues el área debe ser constante. Esto no ocurre con las expresiones (7) y (8) pues en ellas (principalmente la ecuación (7), que puede verse como un plano tangente en un punto a una superficie de  $\mathbb{R}^3$ ) al disminuir un término –o ambos– del lado derecho de la igualdad, se reduce el término del lado izquierdo, es decir, se reduce el valor que toma la diferencial de la función (o en su defecto, la desviación estándar de la función), dándonos mayor precisión en la medida; como observación adicional, puede verse que en estas ecuaciones es posible reducir simultáneamente ambas cantidades del lado derecho, lo que nos da menor dispersión de los datos.

---

<sup>87</sup> Feynman, R., Leighton, R. B. & Sands, M. (1971): *Física. Volumen III: Mecánica cuántica*; Addison-Wesley Iberoamericana, S. A. USA. 1987. p. 1-15.



**Figura 2.** Trayectorias clásica y cuántica de una partícula en el espacio fase  $q$  vs  $p$ . Note que en el rectángulo de área  $h$  es imposible determinar la trayectoria.<sup>88</sup>

En el caso cuántico, una consecuencia extra de la imposibilidad de determinar la incertidumbre de las variables conjugadas y la relación que existe entre el objeto y el instrumento se debe a la interpretación que Bohr hace de PIH, al introducir la inseparabilidad de las imágenes clásicas asociadas a las entidades atómicas, incrementando con ello el rechazo al determinismo laplaciano. Sin embargo, para el autor, que no sabemos si hay o no causalidad asociada a la ocurrencia de un evento de cuantificación de variables conjugadas, no es motivo suficiente para hacer a un lado el eslabonamiento causal, dado que la ocurrencia continúa, así sea probabilísticamente; es decir, PIH no puede descartar la causalidad, aun cuando aparezca disminuida, puesto que siguen existiendo probabilidades de ocurrencia, y con ello, la existencia de las regularidades estadísticas.

Aún así, PIH se asume como un baluarte de la mecánica cuántica al constituirse en un postulado que señala los problemas intrínsecos que conlleva el proceso de medir para determinar, unívocamente, las variables requeridas para dar una descripción completa de los sistemas cuánticos; propone también una incertidumbre ontológica y valida la existencia del azar (y del indeterminismo) en el medio natural, a la par que exhibe claramente las dificultades que tenemos de cuantificar adecuadamente el comportamiento de la onda propuesta por Schrödinger en su teoría ondulatoria, dejando ver que esto es

<sup>88</sup> Tomado de: Alonso, M. y Finn, E. J. (1968): *Fundamentos cuánticos y estadísticos; Vol. III*; Addison-Wesley Iberoamericana. México. 1990. p. 44. (Las modificaciones respecto de la figura original son más).

así porque tal onda es de probabilidad, y (por PIH) es teóricamente inobservable, siendo una onda ajena a nuestro mundo espacio-temporal de 4 dimensiones.

Y es que el fracaso de la ecuación de onda por intentar restituir el determinismo clásico a la teoría cuántica es innegable y, al no lograr hacerlo totalmente, abre paso al azar, y desde un punto de vista lógico, pareciera que totalmente. Esto que digo es fácil de visualizar si suponemos que tenemos la función de onda y empleamos instrumental de medición altamente sofisticado para determinar con la mayor precisión posible las variables conjugadas. Si deseáramos conocer  $q$  instantáneamente (por ejemplo, la posición del sistema), al intentar realizar alguna medida (y según PIH) irrumpimos en el sistema y causamos una perturbación de carácter probabilista que tiene como consecuencia que la “función de onda se colapse”, anulando la posibilidad de conocer el valor instantáneo de la variable  $p$  (por ejemplo, la cantidad de movimiento), y viceversa. Dado que hemos interactuado con el sistema bajo estudio, suspendemos el experimento, y con ello, evidentemente, se pierde la posibilidad de continuar con la observación y también la posibilidad de saber cuál es el comportamiento del sistema (su estado actual y evolución). Ahora bien, al interrumpirse la medición suponemos, con justa razón, que éste retomará su habitual comportamiento ondulatorio –determinado según la ecuación de onda–, aunque quizá ya no en la misma (posible) trayectoria (con su respectivo e inherente atributo estocástico), por lo que continuará así indefinidamente hasta en tanto no se efectúe una nueva perturbación, necesaria ésta para llevar a cabo otra observación; es claro entonces que al comenzar con una observación se modifican las condiciones imperantes (condiciones iniciales para esa observación) del sistema, lo que causa que éste se vea ‘fragmentando’ la continuidad asignada por la ecuación de Schrödinger, quedándonos así sólo un conjunto de “saltos” espacio-temporales en vez de la trayectoria continua, lo que “rompe” con la estructura determinista y nos deja tan sólo con la opción probable –y quizá infinita y no lineal, en el sentido de la trayectoria– de localizarlo en algún punto que estará dentro de nuestro espacio experimental. Pero hay que notar que únicamente hemos mostrado que se ha “roto” la posibilidad de mantener incólume la estructura determinista, pero no hemos visto cómo se ha afectado la relación causal; y es que aunque ha menguado (o incluso, eliminado totalmente) la posibilidad de que la trayectoria pueda asumirse como una sucesión secuencial de eventos mapeados en el espacio, no ha desaparecido la posibilidad de que estos puntos se deban a una relación causal subyacente, puesto que los puntos muestran tendencia a aglutinarse

preferentemente en determinadas regiones del espacio. Es por esto que digo que la relación causal, si bien puede debilitarse, no desaparece. En este mismo sentido se expresa de Broglie, al opinar que

Se podría conservar el término de causalidad para la relación existente entre la causa y el efecto. La tesis de que la causa debe preceder al efecto no puede ser puesta en duda y, en ese sentido, tiene numerosas aplicaciones, particularmente en la teoría cuántica. Esta tesis se encuentra conectada con la definición del pasado y del futuro; definición que es precisada justamente en la teoría relativista del espacio-tiempo. Por consiguiente, no cabe duda de que la noción de causalidad –en el sentido que acabamos de precisar– sigue siendo aplicable en la física cuántica. También se emplea el término de causalidad en un sentido que se podría denominar como determinismo matemático. En una teoría de la física matemática, se cumple el determinismo matemático cuando las ecuaciones de la teoría admiten una solución unívoca del problema de Cauchy. Para un sistema de ecuaciones diferenciales –como las de Newton y Maxwell– esto quiere decir que los valores iniciales y las condiciones en el límite son suficientes para hacer que el problema tenga una solución unívoca.<sup>89</sup>

Esto puede llevarnos a reflexionar acerca de si la probabilidad es, de suyo, una propiedad intrínseca del universo y se debe a factores propios de su constitución o si, dado que depende de una interpretación teórica, se debe al desconocimiento que tenemos del “funcionamiento” del mundo natural, convirtiéndose así en un problema epistemológico y de explicación científica. Rolleri lo expresa magistralmente al decir

La noción de azar que asociaron a los enunciados probabilistas, tanto físicos como filósofos, es una noción epistémica que en parte descansa en bases empiristas también. En una de sus interpretaciones, las relaciones de Incertidumbre de Heisenberg, acotan lo que es posible: conocer acerca de los sistemas cuánticos por medios empíricos –observación, experimentación y medición. Estas relaciones establecen que es físicamente imposible determinar a la manera clásica, con precisión, los valores de las magnitudes que definen el estado de esos sistemas, tomados individualmente. Sólo es posible especificar la probabilidad, extraída estadísticamente de colectivos de sistemas cuánticos, de que esas magnitudes físicas adopten determinados valores en rangos preestablecidos, en situaciones experimentales fijas. Por esta vía, el azar, o indeterminismo, en la mecánica cuántica se entendió de una forma epistémica: como una expresión de nuestras limitaciones objetivas de conocer empíricamente el mundo cuántico impuestas por la propia estructura de ese mundo.<sup>90</sup>

#### 5.4 La mínima información: el cuanto de acción

Supongamos que deseamos obtener la información de un sistema atómico. De acuerdo al principio de Heisenberg, tenemos que

$$\Delta p_x \Delta x \geq h \text{ ----- (9)}$$

<sup>89</sup> de Broglie., *Examen de la mecánica...* p. S29 – 254

<sup>90</sup> Rolleri., *op. cit.*, p. 80.

expresión que, como hemos visto antes, nos impide conocer con detalle, y de manera simultánea, la incertidumbre asociada a la medición de las variables conjugadas involucradas en la observación.

Ahora, para verificar esta expresión, partamos de la información que podemos obtener, en un momento dado, del sistema (tal y como se hace en termodinámica estadística con la entropía de un sistema termodinámico). Brillouin<sup>91</sup> también emplea este concepto al proponerlo como una manera de obtener información de un sistema, aunque él lo hace en términos de la anentropía, que no es más que el inverso aditivo de la entropía.<sup>92</sup> Así, la información es la anentropía del sistema, puesto que cada vez que la entropía aumenta, la anentropía disminuye, y viceversa. Ahora bien, dado que la entropía de un sistema se asocia con el desorden de éste (y del entorno), entonces la anentropía (o información) se asocia al orden.

Brillouin hace un ajuste a la definición termodinámica de la información (o anentropía) pues la propone como

$$I = K \ln\left(\frac{P_0}{P_1}\right) \text{----- (10)}$$

con:  $K$  = constante que depende del sistema de unidades elegido;  $P_0$  = estado inicial del sistema (con resultados equiprobables establecidos de antemano) y  $P_1$  = estado final del sistema (con resultados equiprobables), y generalmente  $P_1 < P_0$ .

En el caso presente, hagamos un ajuste, introduciendo un signo negativo en la ecuación (10), por lo que quedaría la medida final en el numerador y la inicial en el

<sup>91</sup> Brillouin, L. (1969): *La información y la incertidumbre en la ciencia*; Problemas científicos y filosóficos. UNAM. 1969. pp. 25-53.

<sup>92</sup> La entropía  $S$  es una variable de estado de un sistema termodinámico, y se la define como *una función de las variables termodinámicas, cuyo cambio es igual a la integral de  $\frac{\delta Q_R}{T}$  entre los estados extremos, calculada a lo largo de cualquier trayectoria reversible que una ambos estados.* (donde  $\delta Q_R :=$  *diferencial inexacta del calor* (pues depende de la trayectoria seguida) y  $T :=$  *Temperatura* del sistema. Así, el cambio la variación de entropía de un sistema termodinámico estará dado por:  $dS = \frac{\delta Q_R}{T}$ . Comúnmente se le asocia al grado de desorden que alcanza un sistema, y está dada por:  $S = \text{const} \ln \Omega$ , donde  $\Omega = (g_i^{N_i})/N_i!$  (= número de modos según los cuales pueden distribuirse  $N_i$  partículas indistinguibles entre  $g_i$  estados cuánticos) se denomina *probabilidad termodinámica*.  $S$  tiene la particularidad de que en la naturaleza *siempre* aumenta en todo proceso –excepto que éste sea reversible, cosa que no se da–. (Para mayores referencias, consultar: Zemansky, M. W. (1973): *Calor y Termodinámica*; Ed. Aguilar. España. 1973. pp. 217-275). La termodinámica maneja la información como  $I = -\Delta S$ , que es lo que maneja Brillouin.

denominador. Además, hagamos un cambio de variable, al hacer que  $\Delta P := P_1$ , que es una representación más acorde con la notación de PIH, donde  $\Delta P$  podemos asociarlo con los errores de medición, o visto de otra manera, queremos encontrar la información que nos brinda el sistema cuando encontramos su error relativo, como se vio previamente en este capítulo.<sup>93</sup> Asimismo, debemos estar conscientes que la información se refiere a un único objeto atómico tomado de los datos del conjunto de datos recolectado durante un experimento dado.

Así pues, tendremos que la información de un objeto atómico,<sup>94</sup> en el caso particular de las variables conjugadas: posición  $x$  y cantidad de movimiento  $p_x$  (a la que por comodidad denotaré por  $p$ , para no escribir tantas veces el subíndice  $x$ ) estaría dada por:

$$I_x = -cte \ln\left(\frac{\Delta x}{x}\right) \text{----- (11)}$$

y

$$I_p = -cte' \ln\left(\frac{\Delta p}{p}\right) \text{----- (12)}$$

donde  $\Delta x$  y  $\Delta p$  son las incertidumbres asociadas a las mediciones, e  $I \geq 0$ .

Así que la información total que brinda el objeto atómico a la hora de efectuar una medición, estaría dada por

$$I = I_x + I_p \text{----- (13)}$$

pero por (11) y (12) tendremos:

$$\begin{aligned} I &= I_x + I_p = -cte \ln\left(\frac{\Delta x}{x}\right) - cte' \ln\left(\frac{\Delta p}{p}\right) \\ &= -cte \left[ \ln\left(\frac{\Delta x}{x}\right) + \ln\left(\frac{\Delta p}{p}\right) \right] \\ &= -cte \ln\left(\frac{\Delta x \Delta p}{xp}\right) \text{----- (14)} \end{aligned}$$

---

<sup>93</sup> De hecho, el mismo Brillouin da pie para un manejo como el que aquí propongo, cuando contrasta las leyes empíricas con las leyes teóricas. Puede consultarse, en el texto anteriormente citado de Brillouin en las páginas 46-51.

<sup>94</sup> En este caso estoy hablando de una sola criatura cuántica que se ha tomado como muestra de un conjunto de individuos cuánticos que han tenido el mismo comportamiento en un experimento.

donde hemos hecho que:  $cte = cte'$ , por estar usando el mismo sistema de unidades y emplear instrumentos estándar para las mediciones de ambas variables (por ejemplo, podrían ser instrumentos tales como: compuertas digitales que funcionan como cronómetros, o dispositivos para medir longitudes, como espectrómetros, rejillas de difracción, láseres, etc.).

Por otra parte, dado que  $\Delta x \rightarrow 0^+$  y  $\Delta p \rightarrow 0^+$ ,<sup>95</sup> luego  $I$  diverge, es decir,  $I \rightarrow \infty$ , lo cual complica las cosas puesto que nos lleva a suponer que podemos obtener una información infinita del error relativo de una medición, lo cual es imposible. Así pues, y para solucionar esta contradicción, aventuremos entonces una hipótesis arriesgada, es decir, supongamos que  $\Delta x$  y  $\Delta p$  no sean excesivamente pequeños comparados con  $x$  y  $p$ , respectivamente, y evitemos que:  $\Delta x \rightarrow 0^+$  y  $\Delta p \rightarrow 0^+$ , imponiendo como único requisito que sean cantidades positivas y que satisfagan que  $\Delta x < x$  y  $\Delta p < p$ ,<sup>96</sup> tal y como ocurre en una medición ordinaria; esto se debe a que  $x$  y  $p$  son variables medidas habitualmente con el instrumental de un laboratorio tipo, por lo que los instrumentos nos devuelven como lectura de la medición los valores típicos de una variable macroscópica; dicho de otra manera, no deseamos que los errores sean valores muy pequeños o muy cercanos a cero por lo que podemos incluso ampliar más nuestra petición al exigir que tomen valores cercanos a la unidad, aunque pedimos que sean menores que el valor de la medición.<sup>97</sup>

Pero al incursionar en las cuestiones empíricas asociadas a la mecánica cuántica encontramos que los valores de la información obtenida son pequeños, aproximándose a cero (la información, porque prohibimos que los valores puedan acercarse a cero); esto implica que  $I \rightarrow 0$  siempre que el cociente de la ecuación (14) tienda a la unidad; es decir

$$I \rightarrow 0$$

si y sólo si

---

<sup>95</sup> Esto quiere decir que se acerca a cero por la derecha, es decir, tomando solamente valores positivos.

<sup>96</sup> En estos casos, se tendría que los cocientes serían menores que la unidad y el logaritmo de una cantidad

menor que 1 es una cantidad negativa; de hecho, la función:  $\ln x = \begin{cases} \infty, & \text{si } x \rightarrow \infty \\ 0, & \text{si } x = 1 \\ -\infty, & \text{si } x \rightarrow 0^+ \end{cases}$ .

<sup>97</sup> En la mecánica clásica pueden resultar datos como:  $v \pm \Delta v = 72.7 \pm 3.2$ , cm. El error se debe a la propagación de los errores. Como se ve, este dato no sería muy confiable pues la incertidumbre sólo es de un orden de magnitud más pequeña.

$$\frac{\Delta x \Delta p}{xp} \rightarrow 1$$

por lo que debemos evaluar qué ocurre cuando nos acercamos a uno por la derecha (representado por el superíndice +) o por la izquierda (representado por el superíndice -), es decir, debemos encontrar los límites laterales pues el límite de una función existe si y sólo si existen los límites laterales;<sup>98</sup> así pues, y abusando de la notación, debemos encontrar:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta x \Delta p}{xp} \rightarrow 1^- \\ \frac{\Delta x \Delta p}{xp} \rightarrow 1^+ \end{array} \right. \text{----- (15).}$$

Así, si:

$$\frac{\Delta x \Delta p}{xp} \rightarrow 1^- , \text{ entonces: } \frac{\Delta x \Delta p}{xp} < 1, \text{ y por tanto:}$$

$$\Delta x \Delta p < xp \text{ ----- (16)}$$

Análogamente, si:

$$\frac{\Delta x \Delta p}{xp} \rightarrow 1^+ , \text{ entonces: } \frac{\Delta x \Delta p}{xp} > 1, \text{ y por tanto:}$$

$$\Delta x \Delta p > xp \text{ ----- (17)}$$

Claramente, esta expresión nos lleva a una contradicción, puesto que supusimos que las incertidumbres son menores que la medición, por lo que los cocientes son menores que la unidad (es decir:  $\frac{\Delta x}{x} < 1$ , y  $\frac{\Delta p}{p} < 1$ ) además de que esto implicaría que entre más

<sup>98</sup> Esto es un teorema que enuncia: Supongamos que un intervalo abierto contiene el punto  $a$  y que una función  $f$  está definida en todo el intervalo excepto posiblemente en  $a$ . Entonces  $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = L$  si y sólo si  $\lim_{x \rightarrow a^-} f(x) = L$  y  $\lim_{x \rightarrow a^+} f(x) = L$ . (Swokowski, E. W.: *Cálculo con Geometría analítica*; Grupo Editorial Iberoamerica. México. 1982. p. 72)

pequeño sea el error de la medición, mayor información obtenemos (pues  $I \rightarrow \infty$ ), lo que es imposible. De aquí podemos concluir que la única opción aceptable para el producto de los errores lo proporciona la ecuación (16). Note que esto está de acuerdo, hasta aquí, con nuestra suposición básica de la teoría de errores clásica, donde exigimos que  $\Delta x \Delta p \rightarrow 0$ , dado que debe satisfacerse que:  $\Delta x \Delta p \ll xp$ .

Aún así, pasemos por alto la contradicción anterior (ecuación (17)), y prosigamos con nuestro desarrollo; ahora, con ánimo simplificador, facilitemos los cálculos,<sup>99</sup> recordando que de la física clásica puede escribirse que:

$$x = vt$$

y que

$$v = \lambda f$$

con:  $f$  = frecuencia, y  $\lambda$  = longitud de onda, luego resulta que

$$x = (\lambda f)t \text{ ----- (18)}$$

pero sabemos también que, de la ecuación de de Broglie:

$$p = \frac{h}{\lambda} \text{ ----- (19)}$$

por lo que, al sustituir (18) y (19) en (16) y (17), se tiene que:

$$\Delta x \Delta p < xp \Leftrightarrow \Delta x \Delta p < [(\lambda f)t] \left[ \left( \frac{h}{\lambda} \right) \right] = fth \text{ ----- (20)}$$

y

$$\Delta x \Delta p > xp \Leftrightarrow \Delta x \Delta p > [(\lambda f)t] \left[ \left( \frac{h}{\lambda} \right) \right] = fth \text{ ----- (21)}$$

Ahora bien, sabemos que:

---

<sup>99</sup> Aquí utilizo, en aras de la economía y de la comprensión, conceptos ya conocidos de la física clásica, aunque también podrían emplearse las transformadas de Fourier para llegar al mismo resultado.

$$f = \frac{1}{t}$$

por lo que al sustituir en (20) y (21), tendremos que:

$$\Delta x \Delta p < fth = \left(\frac{1}{t}\right)th = h$$

y

$$\Delta x \Delta p > fth = \left(\frac{1}{t}\right)th = h$$

por lo que se puede concluir que, de necesidad:

$$\Delta x \Delta p = h$$

Con esto, hemos encontrado que el producto de las incertidumbres asociadas a las variables de posición y cantidad de movimiento se acerca a la constante de Planck (cuyo valor, en el sistema internacional es de:  $h = 6.6260755 \times 10^{-34} J \cdot s$  ó  $\hbar = \left(\frac{h}{2\pi}\right) = 1.05 \times 10^{-34} J \cdot s$ , es decir, es sumamente pequeño. Esto nos asegura entonces por qué la información cuántica es sumamente pequeña, puesto que, en una medición cualquiera deberíamos exigir que, necesariamente,  $\Delta x$  y  $\Delta p$  sean pequeñísimos, cualquiera de ellos, o ambos. Es decir, la incertidumbre –en términos de la teoría de errores– más pequeña que podemos tener está limitada por la constante de Planck.

Así, y con esta pequeña demostración donde conjunté las variables cuánticas con las variables clásicas –quizá inapropiadamente, pero con gran sencillez–, queda claro que en el caso de los objetos atómicos la información obtenida es casi nula, es decir, no se puede obtener información más allá que la que nos brinda el principio de incertidumbre, por lo que se puede decir que Heisenberg tiene razón, y que la expresión:  $\Delta p_x \Delta x \geq h$ , cuantifica la incertidumbre de la medición, por lo que PIH vale. Evidentemente, toda esta demostración que hice es bastante sencilla, pero puede llevarse a cabo formalmente, cosa que no muestro aquí dado lo engorroso del desarrollo.

## 5.5 La medición y el colapso de $\Psi$

Desde el punto de vista cuántico, PIH señala otro hecho sin precedentes en la física clásica: la intromisión del observador en el experimento, debido a la interferencia que causa sobre el objeto a la hora de realizar una medición; con ello, el observador afecta el comportamiento del sistema bajo estudio y al hacerlo, altera las variables geométricas y/o cinéticas (del objeto), mostrando con ello que objeto y observador están coligados por su mutua interacción, lo que ocasiona que la objetividad ordinaria en la física clásica se desvanezca y le permita el acceso al subjetivismo en la física, cosa impensada antes de la aparición de la teoría cuántica.

Y es que en la física clásica las mediciones habituales se llevan a cabo con instrumental de medición que no interfiere con el evento bajo estudio, y en caso de que lo haga, lo hace en una mínima proporción (a veces de partes por millón). Pero la mecánica cuántica asegura que a nivel microscópico, y debido a las dimensiones de los objetos a observar, la perturbación que causa el observador ya no puede soslayarse dado que se afecta la conducta de la criatura atómica, introduciendo discontinuidades en su constitución y exhibiendo un comportamiento singular que está enlazado con los procesos observacionales del experimentador. Y es que se 've' cómo, enigmáticamente, la entidad atómica modifica su comportamiento habitual –que es el estado en que se encuentra al no haber un observador presente; tal comportamiento, según la ecuación de Schrödinger, sería continuo y completamente determinado– justo en el instante de la observación. Nuevamente, pareciera ser que en el instante de la observación, el objeto cuántico se comportase como una criatura voluntariosa,<sup>100</sup> alterando su comportamiento según las nuevas condiciones locales (de observación), dando pie al establecimiento de un nuevo paradigma observacional: la interrelación profunda entre el observador y el objeto a observar, dado que el objeto atómico se ve afectado por este acto (de observar), lo que nos lleva a pensar en que el objeto se comporta como si renunciara a su independencia conductual, quedando supeditado a las nuevas condiciones externas que le afectan para modificar su conducta, e intentar recuperarla después al aparecer en otro estado, así sea probabilísticamente; esto nos lleva a concluir que es el observador quien debe alterar la función de estado con cada observación que realiza, ocasionando que la función de onda colapse.

---

<sup>100</sup> Sería más conveniente pensar que el colapso de la función de onda es un concepto puramente matemático, en vez de pensar en el objeto atómico como una entidad con libre albedrío.

Tratando de clarificar, pensémoslo a partir de la ecuación de Schrödinger: como sabemos, dicha ecuación buscó reimplantar el determinismo clásico en la teoría cuántica, proporcionando cuál sería el comportamiento de la onda en un referencial dado; lo anterior se consiguió al suministrarnos los estados cuánticos del sistema mediante distribuciones probabilísticas estacionarias; estos estados estacionarios<sup>101</sup> corresponden a los eigenestados –que poseen una energía perfectamente definida– que toma el operador hamiltoniano. Ahora bien, al realizar la medición de un observable del sistema,  $\Psi(x,t)$  (que representa al conjunto de eigenfunciones o eigenestados del observable) se modifica instantáneamente.<sup>102</sup> Dicho proceso de variación es lo que conocemos como *colapso de  $\Psi(x,t)$*  (o *colapso de la función de onda*),<sup>103</sup> y las probabilidades relativas de dicho colapso sobre alguno de los eigenestados están dadas por la función de onda instantánea justo antes de la reducción.<sup>104</sup> Una vez que se ha medido,  $\Psi(x,t)$  colapsa y se reduce a una que esté muy concentrada en torno a una posición observada. Así pues, en este sentido podría decirse que la ecuación de Schrödinger es determinista –y continua– pues, si consideramos una función de onda en un tiempo inicial cualquiera, la ecuación de Schrödinger predice qué función tendremos en un tiempo posterior; sin embargo, durante la medición, el eigenestado al cual colapsa la función es probabilista, por lo que la función se vuelve no determinista y singular (o discontinua en un punto, porque aparece, así sea de manera probable, en otro sitio).<sup>105</sup> Dicho de otra manera, antes de una medición,  $\Psi(x,t)$  nos dice cómo calcular, a partir de eventos que ya ocurrieron, la posibilidad de

<sup>101</sup> En el lenguaje cuántico, la función de estado estacionaria  $\Psi_E(x)$  se dice que es la “eigenfunción del operador hamiltoniano correspondiente al eigenvalor de energía  $E$ .” Así por ejemplo, la expresión  $A\Psi_a = a\Psi_a$  decimos que es la ecuación de eigenvalores, donde  $a$  = eigenvalor del operador  $A$  y  $\Psi_a$  es la eigenfunción de  $A$  correspondiente al eigenvalor  $a$ . En español, el vocablo eigen suele traducirse como “propio”, con lo que eigenvalores se diría: valores propios.

<sup>102</sup> Utilizo el término ‘instantáneamente’ pues la velocidad de ocurrencia es sumamente rápida. De hecho, puede referirse a un buen artículo que aparece en la página web: <http://forum.lawebdefisica.com/threads/4062-Lo-ultimo-sobre-el-colapso-de-la-funcion-de-onda>, donde se analizan resultados del experimento que publicaron: Salart, D. *et al*: *Testing the speed of ‘spooky action at a distance’*, en *Nature* 454 (2008). Según se asegura aquí, la velocidad medida del “colapso” de la función de onda es superior a 10 veces la velocidad de la luz, como mínimo, y en algunos casos, superior a 10000 veces la velocidad de la luz.

<sup>103</sup> Esta terminología se usa a raíz del Teorema de Bell.

<sup>104</sup> Esto es lo que nos lleva a decir que al pretender medir un observable sólo se obtendrá un valor probable y no el valor real. Claramente, la mayor probabilidad se encontrará donde la amplitud de  $\Psi$  es mayor.

<sup>105</sup> Respecto al colapso de la función de onda, y los problemas o paradojas que genera, de la Peña asevera que: “Generar de una manera natural este colapso ha sido tema central de la teoría cuántica de la medición. Sin embargo, desde la perspectiva de ensemble en que nos hemos colocado, no hay un colapso físico alguno; lo que ocurre simplemente es que la observación nos da una nueva información, la cual usamos para construir una nueva *descripción*, consistente con ella: el gato está vivo o muerto” (refiriéndose al gato de Schrödinger). (de la Peña., *Introducción a la ...*, p. 540).

ocurrencia de un suceso y, durante la medición, pensamos que la intromisión del observador (vista como un hecho natural adicional) ha sido quien ocasionó un cambio súbito en el comportamiento de  $\Psi(x, t)$ , siendo este cambio lo que modifica la variabilidad en los datos recolectados y trocando así un problema bien determinado –en el sentido clásico, aunque no observado– en un problema determinado con carácter estadístico-probabilista.

Así que la naturaleza probabilista de la mecánica cuántica se exhibe por el simple acto de medir, lo que se traduce en una limitación impuesta a la incertidumbre y ésta, a su vez, implica que la precisión de un instrumento de medida debe ser, de necesidad, mayor que  $h$ , pues de lo contrario, será imposible efectuar cualquier medida.

## 5.6 PIH y PCB: sostén de la teoría cuántica

PIH “provee la razón fundamental por la cual la mecánica cuántica misma se expresa en probabilidades y no en certidumbres”,<sup>106</sup> y es que además de relacionarse íntimamente con las propiedades de la medición, se vincula fuertemente con la naturaleza dual de los objetos atómicos. De hecho, decimos que PIH, además de convalidar la dualidad de los objetos atómicos asignada teóricamente por PCB, es uno de los bastiones de los demás postulados y resultados de la teoría cuántica, adoptando el papel de puente entre el determinismo y el indeterminismo: de un lado del puente se admite una naturaleza determinista basada en la certeza conceptual, mientras que del otro lado se bosqueja un determinismo probabilístico (o bien, un indeterminismo clásico). Ahora bien, PCB nace de evidencias empíricas<sup>107</sup> (fenómenos de difracción y efecto Compton) y asegura que: “objects in nature are neither particles nor waves; a given experiment or measurement which emphasizes one of these properties necessarily does so at the expense of the other”,<sup>108</sup> en tanto que PIH nace de una demostración matemática. La declaración de PCB señala el problema epistémico presente en una naturaleza dual pero evidente y real, y simultáneamente soluciona tal problemática al asegurar que, si bien a nivel clásico las imágenes corpuscular y ondulatoria son irreconciliables y excluyentes –por no poder

---

<sup>106</sup> Eisberg-Resnick. *Física cuántica. Átomos...* p. 174.

<sup>107</sup> En este caso tenemos un caso más de los inobservables de la teoría cuántica, pues “la teoría del átomo de Bohr no contiene nada que sea observable entre sus hipótesis básicas, y sólo después de un cierto número de deducciones se encuentra alguna proposición experimental comprobable”. (Agazzi., *Temas y problemas...* pp. 199-200).

<sup>108</sup> Saxon., *Elementary Quantum ...* p. 16.

observarse simultáneamente—, en el nivel cuántico esto ya no necesariamente es así puesto que los objetos atómicos presentan ambas propiedades, sin que sepamos cuál es su verdadero rostro.

Sin embargo, PIH en sí y por sí mismo, cuando introduce la indeterminación en la medida debido a la incertidumbre estadística, lo hace desde un punto de vista matemático pero sin clarificar la dualidad o unicidad del objeto; es el apoyo que PCB le brinda cuando considera la naturaleza dual como una característica distintiva del mundo subatómico, lo que le conduce a justificar, aunque sea parcialmente, la indeterminación filosófica, pues ésta se alcanza finalmente porque desconocemos en realidad qué clase de ente natural (o real) es el objeto atómico. Así, podemos pensar que la incertidumbre en la medición que PIH plantea propone una indeterminación de carácter más apegada a la estructura lógica de la teoría que a la fisicalidad del fenómeno, pues no nos dice nada acerca de cómo es en verdad el objeto atómico, sólo subraya la naturaleza dual, dualidad que no aparece explícita y de manera conjunta en ningún desarrollo teórico, como sí ocurre con la naturaleza dual de la luz. Es así que dentro de la teoría cuántica prohíja el maridaje indisoluble entre los dos principios más representativos de la mecánica cuántica antigua, principios que permanecen vigentes hasta el día de hoy y que le dan sentido y una gran fortaleza teórica que concuerda asombrosamente con los resultados experimentales. Así, PIH es incuestionable gracias a PCB, y a su vez, éste es inamovible gracias a aquél.

PIH asegura que se satisface la ecuación (1) debido a que los instrumentos de medida interfieren con lo que se desea medir, y al hacerlo perturban, al menos, una de las variables conjugadas bajo estudio, ocasionando que el objeto atómico asuma comportamientos no bien determinados físicamente debido a la susceptibilidad que presentan ante la interacción. Como queda de manifiesto, PIH y PCB se constituyeron en los preceptos fundamentales de una teoría que relata lo más fidedignamente posible la realidad empírica y la vuelve asequible en el sentido operativo-predictivo, sin preocuparse si se ha omitido la verdadera causa que determina el comportamiento de los átomos.

Y es que PIH y PCB se ligan mediante la función de onda, que no es más que una mejora sustancial a la ecuación de de Broglie, que sería la declaración primaria y más elemental que describe que las entidades atómicas poseen una naturaleza dual, dado que toda onda tiene asociada una partícula, y viceversa. Pero la ecuación de Schrödinger no alude a PIH o a PCB, sino que más bien PCB proporciona los elementos necesarios para que PIH sea irresoluble desde el punto de vista experimental, pues teóricamente es más

claro “ver” el carácter dual que muestran las entidades atómicas y que finalmente termina por relacionarse de manera estrecha con el instrumental de medición y que excluye cualquier posibilidad de injerencia del observador so pena de que al hacerlo, se colapse la función de onda y el experimento cambie, pues la simple observación ocasiona perturbaciones al sistema cuántico.

Pero esto reduce al experimentador a ser un simple fedatario del cauce de los acontecimientos estocásticos del submundo, condenándolo a, cuando mucho, dar una explicación matemático-probabilista del por qué de tal ocurrencia, puesto que los secretos de la naturaleza son tan profundos y distantes que sólo se puede especular y teorizar acerca de ellos. De hecho, Kosso afirma que

The wave/particle duality of quantum systems, the complementary of position and momentum and the Heisenberg uncertainty principle, are results of the experiments and principles of quantum mechanics, not of the properties of our participation in observing a quantum system. These are descriptions of the system itself, not of our interaction with the system. But, since these properties of the quantum system never show up on classical measuring devices, the quantum system cannot be directly observed. None of the distinctively quantum mechanical features of the world are amenable to direct observation. The world never appears to us in a quantum state.<sup>109</sup>

Y es que efectivamente la naturaleza dual sólo se exhibe en los experimentos, lo que nos permite intuir el comportamiento del objeto cuántico sólo por analogía con el comportamiento de la luz: asumiendo que es una onda cuando se propaga y un corpúsculo cuando interactúa con la materia, pero en sí mismo desconocemos cómo es en la realidad el objeto, y esto es debido a que no podemos sumergirnos a indagar qué tipo de imagen clásica afrontamos en la medición: si partícula, onda o una mezcla de ambos conceptos, y por PIH y PCB, no podemos inferir mediante mediciones externas al sistema –considerado como una “caja negra”– qué clase de ente físico es, puesto que las mediciones afectan irremisiblemente su comportamiento. Esto sólo abre la puerta a las especulaciones, cosa que en física se busca evitar, y por eso nos constreñimos a lo que la teoría cuántica dice. Podríamos decir, conjeturando, que el objeto atómico podría ser como un remolino: la parte externa del cuerpo asumiría el papel de onda y su “ojo” podría ser la partícula, o algo parecido. Y es que el concepto de partícula (como entidad abstracta) surge en la física por la necesidad de explicar el movimiento de los objetos en el mundo cotidiano, y es el centro de masas de los sistemas el punto que empleamos para determinar la trayectoria que un cuerpo sigue. En cambio, el concepto de onda surge

---

<sup>109</sup> Kosso., *Appearance and Reality...* p. 158.

de nuestra experiencia al observar el comportamiento de los fluidos (líquidos y gases), para ser extendido posteriormente a la propagación del sonido, instituyéndose el concepto de ondas mecánicas; el concepto de onda después será transferido a la radiación por Maxwell al demostrar que la luz es una onda electromagnética. Pero lo que debe quedar perfectamente claro es que los conceptos de partícula y onda no son más que 'imágenes explicativas' que nos dan razón de determinados comportamientos que asume la materia; asimismo, hay que subrayar que ambas imágenes están inevitablemente ligadas a la estructura espacio temporal, cosa que el objeto cuántico trasciende, pues baste recordar que el modelo de onda de probabilidad nos indica que la onda se propaga sobre el espacio de configuraciones.

El problema básico de PIH consiste en que plantea una avasallante imposibilidad física respecto a la mensurabilidad de los objetos atómicos, lo que nos conduce a no encontrar salida explicativa a la dualidad de los objetos; por mi parte, creo que esto se da así porque no aparece por ningún lado una posible alusión a la relación causal, así sea en términos de las fuerzas o del campo, tal y como ocurre en la teoría clásica; el renunciar al uso de la fuerza se justifica porque ésta, al ser vector, requiere de que se haya fijado un marco de referencia espacio-temporal, cosa que puede complicar la solución del problema. Pero aún así, para hablar de las regularidades estadísticas podría ser más conveniente (a pesar de la dificultad) introducir el concepto de campo (o de fuerza), pues son estos conceptos los que nos permiten ligar los sucesos predecesores con los sucesores; sin embargo, en la teoría cuántica la fuerza no aparece explícitamente porque se prefiere recurrir a la descripción de los sistemas en términos de cantidades ligadas a principios de conservación que a las fuerzas, dada la dificultad en el manejo de éstas. Es precisamente la carencia de conceptos de naturaleza causalista en la teoría cuántica lo que obliga que los objetos atómicos se asuman como entidades de naturaleza dual.

Si se quisiera abordar el problema utilizando la causalidad que sobreviene de la interacción entre el objeto y su entorno, nos encontramos con problemas teóricos complicados porque habría que clarificar cómo se dan las interacciones entre el espacio-tiempo y el objeto atómico. Para ver esto, imaginemos el tránsito de un objeto atómico a través de una región dada del espacio, tal como si una bola de boliche rodara por la canal que la lleva a la mano del bolichista. Como sabemos, en el caso clásico, y a bajas velocidades, se encuentran características invariantes propias del objeto, por lo que el movimiento a través del espacio-tiempo no modifica la estructura ni del objeto ni del

entorno (por ejemplo, la bola de boliche sigue siendo ella, y la manera en que se propaga es al de un corpúsculo habitual; y la canal, aun cuando pueda deformarse, no pierde su apariencia); esto es debido a que los tipos de variables geométricas y cinemáticas, si bien están co-ligadas conceptualmente, se adscriben a objetos diferentes: aquéllas al espacio-tiempo (la canal) y éstas al objeto (la bola de boliche),<sup>110</sup> de lo que se sigue que el objeto no pierde su identidad. Verdad es que quizá exista cierta discordancia en los resultados que puedan obtener y expresar más de dos observadores, pues dependerá de si éstos son inerciales o no, además de que hay que considerar bajo qué régimen de movimiento se encuentran, sea clásico o relativista (aunque esto es relativamente fácil de solucionar, pues los observadores harán los ajustes pertinentes al estado de movimiento en que se encuentran y los resultados deberán ser aproximadamente los mismos. En este caso, lo que sería grave es la pérdida de independencia del objeto respecto del marco de referencia, puesto que allí podríamos esperar que, con mucha probabilidad, aparezcan alteraciones físicas significativas. Aún así, siempre esperamos que el objeto físico sea independiente del referencial desde el cual se observa, de tal suerte que una partícula siga siendo una partícula y una onda no deje de serlo).

Ahora bien, en el caso cuántico esto ya no es así de sencillo,<sup>111</sup> pues pareciera ser que el objeto, de alguna manera, estuviese fuertemente ligado al referencial, y por tanto, al observador. Pero si esto es así, y debido al colapso de la función de onda, el observador vería cosas difíciles de admitir físicamente: al no ocurrir un evento observacional, el espacio, quizá por no ser requerida su manifestación, parecería inmodificado o inclusive, inexistente; si por el contrario, hay una observación, repentinamente veríamos cómo el espacio se hace presente, manifestándose justo en el momento de la interacción entre el objeto atómico y el observador. Estaríamos hablando entonces de que el observador enfrentaría para explicar el acontecer atómico de un conjunto de eventos que involucran al espacio y al 'no espacio', puesto que éste se hace presente o se desvanece continuamente, dependiendo de si hay o no observación.<sup>112</sup> Indudablemente, esto viola el sentido común, puesto que el espacio debe estar presente siempre, haya o no un observador presente. Es claro entonces que la teoría cuántica, al

---

<sup>110</sup> En este caso, variables asociadas al espacio serían, por ejemplo, la posición y el tiempo, amplitud, longitud de onda, etc.; mientras que las asociadas al sistema serían su cantidad de movimiento, fuerza, energía, etc.

<sup>111</sup> Este es un ejemplo teórico explicativo que clarifica la dualidad de los objetos atómico y que me parece estupendamente abordado desde un punto de vista físico-argumentativo. No recuerdo a quien pertenece la idea o mejor dicho, no recuerdo dónde lo leí. Sólo espero no interpretarlo erróneamente.

<sup>112</sup> Algo así como hallarnos frente al gato vivo-muerto de Schrödinger.

verse sitiada por paradojas de este tipo que emanan de la física clásica, acude a una solución brillante: el objeto atómico es una onda-partícula, es decir, es una entidad dual. En este caso, el objeto atómico, adoptando la modalidad de onda, se encuentra ligado a las coordenadas espacio-temporales, por ser la onda quien se propaga, por lo que la partícula es ahora quien parece que no estuviera presente (pues es una entidad puntual, por lo que el espacio se vería como si desapareciese). Sin embargo, en caso de interactuar con la materia, ahora aparece la partícula y la onda no se hace presente. Como se ve, la única relación causal que se deriva de este comportamiento es cuando sabemos que el objeto va a estar en tránsito (haciéndolo como onda), o cuando va a interactuar con la materia (haciéndolo como partícula). Para solucionar este dilema de conversión de onda a partícula, se introdujeron el paquete de ondas y la función  $\delta$  de Dirac. Además, y de acuerdo con este concepto del paquete de ondas, si deseamos encontrar una partícula en determinada región del espacio por la que transita la onda, el paquete de ondas puede encontrarse con una posición definida pero con una imprecisión en el momento, pues éste estará contenido en un intervalo de determinado valor.<sup>113</sup> Es claro entonces por qué el objeto atómico no puede ser medido en cuanto que objeto de naturaleza dual. Asimismo, y de acuerdo a lo que se ha expuesto, la teoría cuántica renuncia a la separación efectiva del objeto del marco de referencia del observador, concluyendo que, efectivamente, en tanto no discurra un objeto atómico por el espacio-tiempo del observador, éste considerará que aquél no existe, y con ello se derrumba la creencia de que existe un mundo objetivo.

Asimismo, la teoría propone que al ser imposible separar el espacio-tiempo del objeto, no es posible generar modelos o conceptos que permitan visualizar la naturaleza verdadera del ente cuántico, por lo que sólo queda como único recurso descriptivo la matematización de la naturaleza siendo lo que podemos vislumbrar de la realidad. Esto es lo que dio pie a la existencia de una 'representación abstracta matemática' típica de la teoría cuántica. El problema es difícil, pues aun cuando admitimos que una teoría describe el acontecer real, a ciencia cierta no lo sabemos, pues ignoramos qué es la realidad, o bien, desconocemos qué tanto estamos cerca de ella, o qué aceptamos como realidad. Es por eso que hasta el presente la teoría cuántica sigue manteniéndose como la mejor opción descriptiva a la hora de abordar la fenomenología subatómica.

---

<sup>113</sup> Esto se debe a la no conmutatividad de los operadores y a la función delta de Dirac.

## 5.7 Conclusiones

La trascendencia de PIH dentro de la física es enorme, dado que limita el conocimiento que podemos allegarnos del comportamiento y verdadera naturaleza del mundo microscópico. Este principio es un corolario matemático de la ecuación de Schrödinger que restringe teórica y experimentalmente la determinación veraz del estado de movimiento de los objetos cuánticos. PIH restringe el acceso a las entrañas de la naturaleza y asegura que podemos interferir con el evento bajo estudio de tal suerte que quizá estudiemos cosas distintas de aquéllas que inicialmente pretendimos observar. No obstante, PIH es un requerimiento teórico absolutamente necesario para una estructuración fuerte, lógica y coherente de la teoría cuántica.

Este principio se entrelaza y armoniza con PCB, justificando su existencia y validez mediante el apoyo mutuo, lo que les permite imponer condiciones para proponer que es nuestra ignorancia de la realidad atómica la que nos impide explicarla por mediciones externas, pues lo único que tiene sentido para el universo cuántico es la representación matematizada fundamentada en la probabilidad y la estadística. Es por ello que PIH y PCB son quienes aseguran la operatividad de la teoría, constriñéndola a ser, de acuerdo al punto de vista clásico, un mero instrumento algorítmico.

Dichos principios, al plantear la intromisión del observador en todo proceso de medida, aseguran que éste (el observador) interfiere, sea dándose cuenta o no, en la evolución del sistema y afecta no nada más el desarrollo del evento, sino también las propiedades del sistema, por lo que se establece un estrechísimo vínculo entre el observador y el objeto observado, lo que rompe con el paradigma clásico de la objetividad de la medida y altera los valores de la medición, mostrando que su presencia como observador ya no es despreciable respecto de los demás datos pertinentes al problema. Esta interdependencia entre sujeto y objeto observado quebranta la visión clásica de que la interferencia del observador en un evento dado suele ser despreciable al compararla con las magnitudes involucradas en el experimento; tal interferencia aparece –en los ámbitos macroscópicos– a lo más, como un error estocástico pequeño en el análisis experimental, pero en la mecánica cuántica esto ya no se satisface.

PIH, además de fijarnos un límite preciso y claro –el cuanto de acción  $h$ – en la pequeñez natural a la cual podemos acceder, promulga la inexistencia de un universo determinista en las regiones subatómicas puesto que los sucesos no pueden ser

predichos con toda exactitud; es decir, PIH asegura que *siempre* tendremos una cota inferior para la incertidumbre en la medida (y con ello, la información que podemos obtener de la constitución de la naturaleza cuántica), cosa que hemos demostrado empleando el concepto de información de la termodinámica estadística, siguiendo a Brillouin. Dicha restricción en la información es una imposición de la naturaleza experimental que nos impide adentrarnos en las entrañas del micro-universo.

Ahora bien, las posturas filosóficas subyacentes en PIH y PCB –al igual que en toda la teoría cuántica– cuestionan la tesis del realismo filosófico pues aseguran que desconocemos cómo es en realidad nuestro mundo, y aun cuando coincidiéramos con la postura de Einstein en lo referente al realismo<sup>114</sup> –al admitir la existencia de una realidad independiente del sujeto que la percibe–, los resultados experimentales se empeñan en avalar lo estipulado por ambos principios, puesto que efectivamente, no podemos acceder cabalmente –al menos hasta hoy– a determinar con precisión el comportamiento de los objetos cuánticos. Dicho de otra manera, pareciera que PIH y PCB nos conducen a una gran disyuntiva desde el punto de vista del conocimiento pleno al sólo permitirnos dar fe de los ‘cómo ocurren las cosas’ en el mundo cuántico. Por ello, si deseamos explicar el acontecer cuántico, tendremos como únicas opciones posibles: (i) reformular la teoría cuántica o (ii) admitir que ésta es cierta, y que no podemos conocer cómo es la naturaleza.

Como es evidente, ambas opciones conllevan grandes riesgos, pues en el caso del primer supuesto, nos encontramos con razones de peso que la vuelven inviable a todas luces, de entre las que sobresalen: (a) que la mecánica cuántica –con sus debidas actualizaciones– es la mejor teoría que se tiene hasta hoy para describir el comportamiento del universo subatómico, pues cuenta a su favor con un cúmulo enorme de grandes éxitos en la predicción de fenómenos microscópicos; (b) la elevada precisión que brinda en los experimentos; (c) la enorme aceptación que le ha dispensado la comunidad científica; (d) su fortaleza matemática, y (e) que no ha aparecido ningún experimento que la contravenga tajantemente.

El segundo supuesto parece, por una parte, una tesis más difícil de comprobar, pues de acuerdo a un sinnúmero de evidencias experimentales y predicciones teóricas se han validado los múltiples logros y resonantes éxitos de la MC, dando testimonio de que existe una naturaleza microscópica que se niega a ser explicada. Por ello, la mecánica cuántica

---

<sup>114</sup> Popper., *Teoría cuántica y el cisma en...* p. 67.

se ha abocado a ‘estudiar’ el comportamiento del micromundo, proporcionándonos una descripción bastante satisfactoria, aun cuando no se comprometa a dar una explicación del por qué de los fenómenos, lo que por el momento nos lleva a aceptar, aunque sea a regañadientes, que es imposible conocer –de acuerdo a lo que enuncia la teoría y pregona cuando habla de la completitud– directamente cómo es el mundo cuántico, impeliéndonos con ello a seguir especulando cómo acercarnos a él y a cuestionar cuál es la verdadera función de una teoría; esto es, si debe sentar las bases para hallar una representación del ‘por qué’ del devenir de las cosas o si es válido que se limite a describir y predecir la ocurrencia de los sucesos. Estas visiones de lo que debe ser la física han mantenido vigente la controversia entre las diferentes posturas filosóficas que subyacen en la física cuántica, de entre las que descuellan la polémica desatada entre Einstein y Bohr (y de manera un tanto alejada y tangencial, de Popper) y sus respectivas opiniones: física realista *versus* física instrumentalista; teoría explicativa o teoría descriptiva; es objetiva o subjetiva, y por supuesto, si es determinista o indeterminista. Esta obligatoriedad (incluso moral) de la física por dar razón de la realidad encauza en vías alternas la realidad del mundo natural: mientras que Einstein propugna una realidad independiente del sujeto, considerando que la realidad existe haya o no quien la perciba y/o dé cuenta de su comportamiento, Bohr apoya una realidad cuántica en la que el observador asume un rol participativo que se relaciona directamente con el objeto a observar. Para Einstein la física –y en general, la ciencia– es el único medio por la cual podemos representar verídicamente cómo es la naturaleza, sin importar el referencial del observador; por lo que se niega a admitir la intromisión del azar como un elemento propio de la naturaleza, y rechaza que la mecánica cuántica sea completa al aducir que una teoría es susceptible de ser modificada con la pretensión de ampliar sus horizontes explicativos.

En el área filosófica Popper también se asume como un defensor del realismo y critica abiertamente el subjetivismo, o el rechazo al objetivismo, que impera en la teoría cuántica; para él, como para Einstein, el mundo es independiente del observador, y la tarea de la ciencia –y sobre todo de la física– es la de explicar objetiva y fríamente la ocurrencia de los fenómenos en el mundo natural. Es por ello que se pone del lado de Einstein para hacer una apología del realismo, al decir

La cuestión central aquí es el realismo. Es decir, la realidad del mundo físico en que vivimos: el hecho de que este mundo existe con independencia de nosotros; que existió antes de que existiese la vida,

según nuestras mejores hipótesis; y que continuará existiendo, por lo que sabemos, mucho después de que todos nosotros hayamos desaparecido.

He argüido a favor del realismo en varios lugares. Mis argumentos son en parte racionales, en parte *ad hominem* y en parte, incluso, éticos. Me parece que el ataque al realismo, aunque intelectualmente interesante e importante, es bastante inaceptable...<sup>115</sup>

En contraparte, los líderes de la física cuántica –Bohr, Heisenberg, Born, Pauli, y Dirac, entre otros– no admiten la visión realista de Einstein y aseguran que la teoría cuántica es completa y se manifiesta tanto teóricamente (con el lenguaje matemático) como experimentalmente –con los errores debidos a la incertidumbre–, y que sólo está obligada a dar una descripción del acontecer subatómico, pues la naturaleza cuántica no puede ser explicada. Con ello, concluyen que la mecánica cuántica no tiene el deber de explicarnos por qué ocurren las cosas en el mundo natural, siendo suficiente con que nos dé una descripción y prediga la ocurrencia de los eventos.

PIH y PCB justifican los argumentos de los defensores de la mecánica cuántica, por lo que se erigen como parte central de la teoría. Como mencioné, ambos principios cooperan entre sí vedando el acceso al conocimiento de la verdadera naturaleza de los objetos atómicos, dado que imponen una cota inferior imposible de superar mediante la metodología experimental contemporánea. Y es que el valladar infranqueable que nos impone PIH se asocia, en primera instancia, al carácter estadístico ligado a las mediciones que se traduce en una imprecisión o incerteza del comportamiento del objeto atómico. Esta incertidumbre estadística nos lleva, de acuerdo a su expresión matemática ( $\Delta q \Delta p \geq \hbar$ ) a una verdadera indeterminación en los ámbitos de la física y posteriormente, de la filosofía, al no permitir discriminar con certeza cuál es la verdadera naturaleza física de los objetos atómicos (corpúsculos u ondas). Así, sólo nos queda como único ‘conocimiento’ físicamente admisible de los objetos atómicos aquél que podemos obtener mediante mediciones; este ‘conocimiento’ experimental que sólo describe el virtualmente posible comportamiento de las entidades subatómicas se encuentra respaldado por desarrollos matemáticos que le confieren cierto grado de confiabilidad y subsumen la matemática como la única representación simbólica, en este momento, de la realidad.

Y es que representar el comportamiento natural mediante símbolos y después contrastarlo con los experimentos para encontrar concordancia entre lo predicho por el modelo y lo obtenido empíricamente nos induce a pensar que la realidad, si no es, al menos goza de atributos de naturaleza matemática, que es lo que le confiere cierta

---

<sup>115</sup> *Ibíd.* Popper. Prefacio de 1982. Los párrafos son de las páginas 30 y 26, respectivamente.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

logicidad que hace que se comporte como lo hace. Aunque esta postura idealista, si bien es atractiva por su simplicidad lógico-conceptual, introduce un pequeño problema: la transmutación que experimentarían los objetos matemáticos al convertirse en entidades materiales. Tal transfiguración de cualquier entidad abstracta a una entidad material carece de explicación racional, pues involucra ciertas dosis de animismo. Sin embargo, si esto se invierte, por ser más fácil de admitir y de justificar lógicamente, encontraremos que en la naturaleza los procesos evolutivos siguen cierto orden lógico-secuencial en los que predomina la búsqueda y alcance de estados estabilizadores que racionalizan el uso de energía, y que tales procesos pueden ser representados mediante modelos racionales<sup>116</sup> que están sometidos a determinadas causas aunque nos sean hoy desconocidas. Ahora bien, si esto es verdad —es decir, que en la naturaleza subyace cierta logicidad en sus procesos— entonces la teoría cuántica dejaría de lado la transfiguración y estaría explicando el comportamiento de los objetos materiales al establecer un isomorfismo entre el modelo y el acontecer natural. Evidentemente, la logicidad natural aparecería como un sustrato inmanente a los seres vivos que habitan y adoptan el papel de observadores en el universo. A fin de cuentas, las leyes físicas son universales —al menos hemos encontrado que se cumplen en el universo conocido—. En este sentido, la teoría cuántica alcanzaría el rango de teoría explicativa (o semi-explicativa), pero basándose en una especie de realismo matemático más que en un realismo materialista, y en este sentido, PIH vale y avala el comportamiento del proceder atómico.

En lo que respecta al azar que conlleva PIH, pienso que éste (el azar) se debe más al desconocimiento que tenemos del funcionamiento natural que a considerar que la naturaleza es azarosa en sí misma. Es decir, la naturaleza puede manifestarse en cambios súbitos en eventos que estamos acostumbrados a percibir, sin embargo, también es claro que en cuanto ocurre la variación, rápidamente tiende a alcanzar cierta estabilización que se manifiesta como cierta regularidad en su comportamiento. Podemos pensar, por ejemplo, en las mutaciones de los seres vivos, que si bien son azarosas,

---

<sup>116</sup> Que de necesidad debe ser lógico, pues el hombre es un ser contenido en la naturaleza, por lo que debe gozar de atributos que aquélla tiene. Lo mismo debe ocurrir con los animales, pues su comportamiento también ha mostrado ciertos patrones de conducta apegados a la lógica, aunque con ciertas connotaciones propias de la clase de animales que se trate. Por ejemplo, el que las abejas y avispas construyan sus panales con celdas hexagonales sostenidas por triángulos no es casual, pues están utilizando algunas de las figuras geométricas más resistentes a la carga dentro de la naturaleza. O la forma de los huevos de las aves, que emplean la elipse como figura predominante. O la migración y hacinamiento de muchísimas especies, etc.

están perfectamente limitadas –o quizá delineadas por las mismas necesidades biológicas de las especies– para ambientarse a su hábitat. Ahora, supongamos que se alcanza un número significativo de mutaciones azarasas; conforme transcurre el tiempo, la variación mutacional aleatoria decae hasta alcanzar un ‘estado de cuasi-invariabilidad o cuasi-inmovilidad genética’, o sea, hasta que casi cesan las mutaciones y se estabiliza la mutación más exitosa, desechando aquéllas indeseables, bien sea por auto-eliminación (como canibalismo, competencia interna, endogamia, etc.), por exceso en consumo energético o por imposibilidad reproductiva. A fin de cuentas, vemos que desaparecen las especies incapacitadas para trascender biológicamente. Entonces, habría que determinar con toda precisión si el azar no fue una consecuencia inducida con fines selectivos, producto del ecosistema o de las necesidades naturales de las distintas especies que mutan, siendo evidente que si una mutación no se adapta, rápidamente se retira de la escena natural.

Así, no sabemos por qué se dio la mutación de determinada especie, sólo sabemos que se dio y que poco a poco decrecen los movimientos mutantes aleatorios hasta alcanzar cierta estabilidad por mucho tiempo. Igual ocurre con el lanzamiento de un dado, por ejemplo, pues ignoramos qué condiciones iniciales y qué factores característicos del dado o qué factores ambientales determinan que caiga un 3, por ejemplo, en un lanzamiento. En este caso, el azar es una medida de nuestro desconocimiento de la naturaleza, más no porque ésta esté indeterminada, sino porque no conocemos por qué se comporta de una forma en particular; es decir, el azar, en este caso, es un problema epistémico. Pero este tipo de azar epistémico, pienso, tiende a ser objetivo, porque es un azar que aparece sistemáticamente afectando a todos los eventos o procesos por igual; es decir, es un azar que está fuera de nuestro control, siendo un azar característico de la naturaleza que aparece fuera del ámbito de nuestras virtuales posibilidades de manipulación experimental por lo que alcanza el rango de azar epistémico-objetivo; el grado de objetividad se le asignaría por ser independiente de nosotros como observadores, por provenir de hechos objetivos y por tener, adicionalmente, como respaldo formal una teoría matemática totalmente objetiva.

Así, creo que el azar de PIH es parecido a lo que recién propuse: es un azar epistémico-objetivo, pues si bien conocemos el posible comportamiento del objeto cuántico en un experimento, desconocemos esencialmente por qué de tal comportamiento, y esto es independiente de nosotros. Asimismo, la estadística

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

subyacente en PIH asociada a la teoría de errores conduce a una indeterminación que radica en la forma matemática que PIH tiene y que está estrictamente apegada a los postulados de la teoría cuántica y al desarrollo matemático. Dicho de otra forma: el azar de PIH procede de una indeterminación de carácter estadístico, indeterminación que se traslada posteriormente a la filosofía como un azar epistémico que se deriva de la demarcación natural –al menos es lo que pienso– entre las realidades micro y macroscópica, siendo imposible abordar aquélla mediante mediciones que se rigen bajo la tesitura clásica. Además, esta incertidumbre estadística, por su forma y obtención, es única, lo que impide fijar la incertidumbre (o la precisión) de ambas variables conjugadas, cosa que no ocurre en la teoría clásica; claramente, la expresión matemática de PIH no permite obtener gran información de los eventos cuánticos, pues nos lo impide el cuanto de acción. Así, es este tipo de incertidumbre estadística lo que moldea su postura filosófica eminentemente incierta e indeterminista; y es que al intentar manipular las incertidumbres en las mediciones corremos el peligro de incurrir en una indeterminación teórica que aparece mediante una representación simbólica y que refleja la profunda ignorancia que tenemos del acontecer cuántico.

Ahora bien, cuando realizamos una medición directa, sabemos que el instrumento de medición y el objeto a medir comparten, digámoslo así, una frontera común que permite el intercambio de información; en el caso de un sistema macroscópico la fineza del instrumento medidor no afecta al sistema a medir, por lo que podemos pensar que la frontera está “desplazada” hacia el instrumento de medición, y que entre más “cerca” esté dicha frontera del instrumento, hay más certeza en la medida, puesto que el medidor “jugaría” como un elemento accesorio e indistinguible del sistema bajo observación. Pero en el caso de un objeto atómico, si la frontera se “adhiere” al instrumento de medida, podría no detectar el objeto a observación, dadas las magnitudes tan pequeñas del objeto atómico; requeriríamos entonces “desplazar” la frontera hacia el objeto, lo que lo afectaría indefectiblemente y falsearía las lecturas; así, la incertidumbre que obtendríamos no gozaría de confianza alguna, por lo que el objeto atómico que percibimos bajo el instrumento de medición podría ser distinto de aquél que creemos estar cuantificando. En el caso de una medida indirecta el caso aún es más crítico, puesto que puede haber pérdida de información en el trayecto sistema-instrumento. PIH propone que la realidad puede ser muy otra de la que creemos que estamos observando, es decir, estamos hablando de una realidad dependiente del sujeto percibiente vía el instrumental de

medición, restándole objetividad al hecho mismo de medir. Por esto, PIH exalta la no objetividad de los sucesos atómicos, aunque exista cierta independencia en el acontecer y el evento se muestre de manera semejante a cualquier observador.

Aun así, PIH ha coadyuvado conscientemente, ante la imposibilidad de dar una explicación del acontecer cuántico acorde al realismo de la teoría clásica, a conformar una teoría que se ha parapetado tras leyes cien por ciento empíricas y que se rehúsa a buscar posibles modificaciones teóricas de fondo en algunas de sus leyes, aduciendo que la teoría tal y como está conformada es exitosa en su carácter predictivo, y que su legislación es la menos ambigua posible para describir el inaccesible mundo subatómico (cosa que es totalmente cierta), sin importarle que la tilden de ser una teoría instrumentalista y regida totalmente por la matemática, y sin preocuparse porque no contiene, aparentemente y desde la visión conceptualista tradicional, ni un pequeño ápice explicativo que conduzca a desarrollar elementos intuitivos o ideográficos y dé razón del microuniverso. Ella misma, la teoría cuántica, ha impulsado la tesis de que la naturaleza es, en sí misma, indeterminista aunque no proponga con claridad por qué se dan las regularidades estadísticas y, así sea de soslayo, parece que mantiene el determinismo científico vía ecuación de Schrödinger. En el peor de los casos, PIH, como el resto de la teoría cuántica, se ha erigido como un principio eminentemente matemático que relata el desconocimiento físico que tenemos de la naturaleza atómica y que, bajo el punto de vista de la percepción realista de la física clásica, sólo alcanza a describir el acontecer del mundo externo; en tal tenor, tanto PIH como la teoría cuántica propugnan una realidad matemática, y si pensamos que posiblemente por eso es que la realidad es matematizable en (casi) todos sus aspectos, entonces, PIH alcanzaría el rango de explicativo, dando verdadera cuenta del acontecer subatómico, por lo que sería digno de tenerse en cuenta que este principio es, verdaderamente, más una ley fundamental de la naturaleza que un mero principio descriptivo.

## Conclusiones

A través del presente trabajo se ha transitado por muchos senderos de la mecánica cuántica y se ha documentado en buena medida parte de las múltiples vicisitudes que dicha teoría ha afrontado para describir los eventos relacionados con el micromundo. Esta teoría ha causado un hondo impacto en el pensamiento científico al proponer una insólita visión de la naturaleza después de subir al escenario científico la discontinuidad de los procesos naturales; y es que la física cuántica puso en evidencia la realidad que cotidianamente percibimos como continua, arguyendo que la continuidad solamente aparece en los niveles ordinarios de observación, ya que a niveles atómicos la naturaleza se muestra totalmente discreta, desapareciendo así la posibilidad de describir con toda precisión el comportamiento de los sistemas microscópicos. Esta propuesta causó una gran conmoción en la comunidad científica e impulsó una revolución conceptual que puso en entredicho la eficacia explicativa de las leyes de Newton.

No obstante, era obvio que la mecánica cuántica debía esperar muchas y variadas opiniones, tanto a favor como en contra. De entre las objeciones descuellan las que expuso Einstein, al cuestionar severamente la completud y la carencia de objetividad de la teoría. De las opiniones que estaban a favor, evidentemente sobresalen las de los suscribientes de la Interpretación de Copenhague, y aún hoy día hay opiniones favorables de físicos de la talla de Hawking y Penrose, por citar algunos; puede decirse, sin temor a equívoco alguno, que la teoría nació siendo controversial.

De entre los presupuestos fundamentales para el desarrollo teórico cuántico destaca el Principio de Heisenberg, por ser quien abre la puerta al indeterminismo como elemento constituyente esencial de la nueva física. Tal principio garantiza la existencia del azar en la naturaleza, proponiendo que ésta es azarosa en sí misma al esgrimir que el azar es una característica propia del mundo externo, negando con ello la existencia de un orden natural que se manifiesta en forma de leyes naturales.

Sin embargo, si bien esto puede ser admisible a nivel cuántico, en lo que respecta al nivel macroscópico no es del todo claro. Esto lo expongo puesto que, tal y como aparece en los dos primeros capítulos, la postura determinista ha soportado con firmeza los embates de la postura indeterminista, y lo ha conseguido gracias a su eficacia predictiva y

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

su poder explicativo que dan cuenta del por qué de la ocurrencia natural, a tal grado que aún hoy sigue siendo la figura emblemática del explicacionismo científico. Y es que la visión de algunos científicos que consideraron a la naturaleza como un gigantesco mecanismo donde era necesaria cierta secuencialidad en los eventos (la causa antecediendo al efecto) ha permeando variopintas teorías que han aparecido a lo largo de tres siglos, haciendo que de una u otra manera se sujetaran a la legislación newtoniana. Esta legislación introdujo el concepto de fuerza como el ‘eslabonador’ (incluso lógico) de los sucesos; sin duda esto fue lo que permitió que la fuerza se erigiera como la panacea explicativa del mundo natural. Aún perdura esta idea, y el autor encuentra que este concepto –o sus modalidades, como la teoría de los campos– reúne los requisitos para continuar explicando el por qué de las cosas, y que cuando no logramos hacerlo así, caemos en problemas que parecen ser irresolubles. El estudio de los objetos atómicos es uno de esos problemas, y quizá por ello, la mecánica cuántica parece inclinarse por el indeterminismo.

Sin embargo, el problema central debe ser, más que el determinismo –incluso considerado como un recurso metodológico–, la amplitud y validez de la relación causal, pues a fin de cuentas es ella la que aparece en las tesis deterministas e indeterministas, aun cuando esta última, considero, no se puede sostener por sí misma aludiendo a la repetitividad de los eventos y apoyándose solamente en las regularidades estadísticas, pues a fin de cuentas, el hecho de que haya una regularidad estadística implica, de necesidad, una región de estabilidad que el sistema debe alcanzar en determinados momentos, y esto es una explicación determinista. El ejemplo de la pelota rodando cuesta abajo por las laderas de una colina de forma parabólica (y cóncava hacia arriba) es un claro ejemplo, pues si la energía con que baja la pelota es muy grande, la pelota puede salir por uno de los bordes y jamás regresar, por lo que el evento sería único y prácticamente inestudiable. Pero si la energía no es demasiado grande, no importa cómo ruede la pelota por las laderas,<sup>117</sup> tarde o temprano llegará a pasar por la región de estabilidad, repitiendo el ciclo una y otra vez, hasta agotar su energía. Como se ve, en este tipo de movimiento aparece involucrado el concepto de equilibrio, que es un concepto determinista. Esto creo que se puede hacer extensivo a todos los sistemas que muestran un patrón de comportamiento regular.

---

<sup>117</sup> Obviamente, supongo que el movimiento no debe ser meramente circular sobre un plano normal al eje de la parábola.

Por otra parte, es altamente improbable que los eventos se sucedan sin tener un antecedente. El desarrollo probabilista que aparece en el capítulo 2, basado en una idea de Popper, muestra que si bien es difícil probar contundentemente la relación causal, tampoco se puede excluir de manera categórica, puesto que requeriríamos hacer un estudio con una muestra demasiado grande para validar los asertos de una u otra parte. No obstante, del análisis del odds ratio (o cociente de momios) para la ocurrencia de los eventos se obtuvo que:

$$odds\ ratio(efecto) = odds\ ratio\left(\frac{causa}{\sim\ causa}\right) = \frac{n_{11}n_{22}}{n_{12}n_{21}}$$

y

$$\begin{aligned} \theta &= \text{logito}\left(\frac{(causa)}{(\sim\ causa)}\right) \\ &= \ln\left(odds\ ratio(efecto) = odds\ ratio\left(\frac{causa}{\sim\ causa}\right) = \frac{n_{11}n_{22}}{n_{12}n_{21}}\right) \end{aligned}$$

Lo que nos conduce a que

$$P(causa) > P(\sim\ causa)$$

siempre que:  $n_{11}n_{22} > n_{12}n_{21}$ , lo que muestra que cuando siempre que hay una causa, hay un efecto. En este caso, estamos hablando de una regularidad estadística, en tanto que la certeza de la física clásica se alcanzaría cuando  $n_{11}n_{22} \rightarrow \infty$  o bien, cuando  $n_{12}n_{21} \rightarrow 0$ . Así, con esto se puede intuir que la relación causal es inherente a la naturaleza y sus leyes, por lo que tal relación se mantiene, así sea débilmente. Con esto puede explicitarse que, si bien podemos no aceptar plenamente que toda causa produce un efecto (que en este caso, sería el efecto que esperamos), es aún más inviable admitir que hay efectos sin causa, por lo que en caso de que aparezca un efecto sin aparente causa, debemos buscar qué otra(s) causa(s) lo produjo(produjeron).

Por otra parte, si bien es verdad que la mecánica cuántica no utiliza explícitamente la fuerza como un elemento explicativo en términos causalistas, tampoco la desecha, pues la fuerza aparece implícita en la cantidad de movimiento y la energía. La otra opción para

introducir la causalidad en la teoría cuántica es conjeturar si no es viable entrever que el comportamiento de los objetos atómicos podría deberse a la configuración, que a niveles atómicos, el espacio pueda tomar; además de que el grado de intensidad con que la interacción se manifieste entre los eventos antecedente y subsecuente dependerá del grado de lisura, rugosidad o compacidad que el espacio pueda asumir, pues esto afectaría el comportamiento de los objetos que en él se encuentren. En este momento, es una posibilidad que se está investigando, y que no se debe descartar.

Igualmente, queda claro que la mecánica cuántica no es del todo indeterminista, como habitualmente se supone. De hecho, y tal como hemos visto, esta rama de la física consta de dos teorías que coexisten simultáneamente: una teoría que aboga por la discretitud y el indeterminismo de los eventos naturales, y otra que intenta restituir el determinismo y la continuidad de los eventos; la primera es la teoría matricial de Heisenberg, y la segunda es la teoría ondulatoria de Schrödinger, y ha quedado demostrado que son compatibles entre sí. La teoría matricial parece ser que es más completa, puesto que contempla (y 'explica') eventos que la teoría ondulatoria no logra solucionar.

Ambas teorías son equivalentes entre sí, y de ellas se deriva, como un teorema matemático,<sup>118</sup> el Principio de Incertidumbre de Heisenberg (PIH). Este principio, junto con el Principio de Complementariedad de Bohr (PCB) son, si se les puede llamar así, los verdaderos baluartes de la teoría cuántica, promoviendo PIH la imposibilidad de conocer con detalle el estado de movimiento de los objetos atómicos al asegurar que es imposible medir de manera simultánea las variables cinemáticas ( $p$ ) y cinéticas ( $q$ ) necesarias para describir el comportamiento del sistema, dado que nos lo impide el cuanto de acción  $h$ , al relacionarlas mediante la expresión:  $\Delta q \Delta p \approx h$ , impidiéndonos con ello conocer cómo es el objeto atómico bajo observación. Esta constante es quien establece la inextricable vinculación entre una onda y una partícula, al yuxtaponerlas en la expresión de de Broglie:  $p = \frac{h}{\lambda}$ . Asimismo, PIH valida la naturaleza dual de las entidades cuánticas, pues al prohibir la medición, se impide un conocimiento certero de con qué tipo de imagen clásica estamos tratando, si con una onda o con un corpúsculo.

Es PCB, quien autoriza la conjunción de los conceptos clásicos de onda y partícula en una sola entidad, pero sin decirnos cómo y por qué se da tal fusión. Así, PCB legitima la dualidad cuántica en un solo individuo cuántico, cosa impensable en la teoría clásica,

---

<sup>118</sup> Este Teorema es bastante difícil de probar por un método alternativo al de las transformadas de Fourier y siguiendo los cánones cuánticos. De ahí su validez cuántico-matemática.

solucionando vía un postulado, el problema epistémico subyacente en la doble personalidad de los objetos atómicos.

Ahora bien, el problema que abordé fue ver si PIH se refiere a la incertidumbre experimental o a la indeterminación filosófica. Tal como he intentado probar en el trabajo, sobre todo en el último capítulo, PIH se relaciona, en primera instancia, con la incertidumbre asociada a las mediciones, y hemos encontrado que, efectivamente la máxima información menor que podemos obtener de un sistema cuántico está limitada por el cuanto de acción,  $h$ , volviéndose ésta una constante fundamental de la naturaleza que, de una u otra manera, nos lleva a relacionarnos con la probabilidad y la estadística y que impone la pauta en lo que se refiere a la continuidad o no de los procesos naturales; es decir, si la naturaleza excede la magnitud de  $h$ , entonces la percibimos como si fuese continua, mientras que si es menor que la magnitud promulgada por dicha constante, será discreta. Simbólicamente lo podemos abreviar como:

si:  $mn :=$  orden de magnitud de la naturaleza (que puede estar dada en J-s, para que la comparación sea sencilla y la expresión sea homogénea), entonces se cumple que:<sup>119</sup>

$$\text{si } mn \begin{cases} \gg h, & \text{los eventos son continuos} \\ \approx h, & \text{los eventos son discretos} \end{cases}$$

Claramente, en el mundo macroscópico nos encontramos en el primer supuesto ( $mn \gg h$ ), y por eso los fenómenos son, en su inmensa mayoría, continuos, y percibimos que las entidades naturales son independientes unas de otras, mientras que en el segundo caso, y al no poder acceder a lo más recóndito del átomo, caemos en una naturaleza que se exhibe como si fuese discreta; es evidente que ambos casos traen aparejadas consecuencias, aún cuando estén soportados teóricamente. En una naturaleza continua, podemos hablar de eventos continuos donde es posible determinar con claridad, a partir de las condiciones iniciales y del estado dinámico que el sistema guarda, la evolución que tendrán tales eventos. Esto ha permitido que el estado que guarda un sistema en todo tiempo sea descrito como una función del tiempo de la forma  $S=S(t)$ , con  $t \in [t_0, t]$ , lo que permite seguir la evolución del sistema.<sup>120</sup> Es el conocimiento del estado dinámico de un sistema lo que posibilita dar explicaciones

<sup>119</sup> El símbolo  $\gg$  significa “mucho mayor que”, mientras que  $\approx$  significa “aproximadamente igual a”.

<sup>120</sup> Inclusive, para conocer cómo evoluciona el sistema, la función puede estar dada en términos de variables de estado y, por supuesto, del tiempo (véase el capítulo 2).

convincentes del por qué la naturaleza asume tal comportamiento, incluidos los fenómenos que tienen que ver con el azar.<sup>121</sup>

Pero esta continuidad de los sucesos es precisamente lo que ha conducido al determinismo de la teoría clásica, donde éste lo entiendo como: *aquel supuesto que permite determinar (o pronosticar) en un marco de referencia inercial dado, y con un grado de precisión aceptable, la evolución del sistema, y donde los sucesos constituyentes se entrelazan entre sí –lógica y/o físicamente– para mantener una secuencia de avance monótonamente creciente que proporciona unívocamente, y para cualquier instante en el referencial especificado, una respuesta del sistema. El evento resultante de la conjunción de sucesos se denomina efecto y los sucesos que motivan la respuesta se denominan causas.*

Según esta definición, la teoría cuántica no sería una teoría determinista, puesto que sólo satisface parcialmente el enunciado; sin embargo, no es del todo indeterminista puesto que utiliza el tiempo como un elemento indispensable, y ordenado, para las observaciones y, aunque no se conocen con precisión, considero que existen eventos antecedentes que pueden fungir como causales de otros sucesos. Haciendo caso omiso del referencial inercial que aparece en la definición, el Principio de Incertidumbre de Heisenberg, por el simple hecho de no requerir de un referencial determinado, resultaría ser no determinista, por lo que la mecánica cuántica es también no determinista (en el sentido de la definición, y lo mismo en el sentido clásico) aunque para mi gusto, es una teoría determinista en sí misma, así sea parcialmente (porque la teoría matricial es indeterminista), puesto que en la ecuación de Schrödinger aparecen implícitos el determinismo y la continuidad.

Más aún, pues en el caso cuántico (cuando  $mn \approx h$ ) el determinismo se desvanece ya que no es posible determinar con toda precisión el comportamiento del sistema, tanto espacial como temporalmente, imposibilitando por tanto dar una caracterización unívoca del estado de movimiento del sistema, tal y como se da en la física clásica; es decir, ya no es posible expresar la trayectoria de los objetos con una relación funcional de la forma  $S=S(t)$ . Así pues, lo que postula PIH es que no se puede pronosticar con certeza el

---

<sup>121</sup> Por ejemplo, en la teoría cinética de los gases, donde se asume que el azar proviene de valores promedio asociados a las distribuciones medias de colisiones de las partículas, de las rapidezces medias, de las trayectorias libres medias, etc. Esto es lo que nos lleva a pensar que el azar visto así, en términos de la probabilidad clásica, está relacionado con leyes naturales simples, aun cuando yazgan en las profundidades de la naturaleza. En este caso, el azar y la probabilidad tiene más que ver con nuestro desconocimiento de las normas que rigen el comportamiento natural.

comportamiento futuro del sistema, aunque sí pueda hacerse probabilísticamente. Esto es lo que se desprende debido a la información tan pequeña que puede brindarnos un sistema cuántico,<sup>122</sup> donde dicha información está dada por el cuanto de acción. De hecho, lo he mostrado mediante el uso de la información, en el sentido de Brillouin –que a su vez se basa en la información termodinámica–, al obtener cuál es la información que nos suministra el error relativo de una medición, obteniendo que, si  $I$  es la información, entonces ésta puede obtenerse de:

$$I = K \ln\left(\frac{P_0}{P_1}\right)$$

donde  $P_0$  es el estado inicial del sistema cuando inicia la observación, y  $P_1$  es el estado final del sistema al concluir la observación. Haciendo los ajustes pertinentes al manejo del error relativo, tenemos que las informaciones de las variables canónicas conjugadas posición ( $x$ ) y cantidad de movimiento lineal ( $p$ ) serían:

$$I_x = -cte \ln\left(\frac{\Delta x}{x}\right)$$

y

$$I_p = -cte' \ln\left(\frac{\Delta p}{p}\right)$$

respectivamente, donde  $\Delta x$  y  $\Delta p$  son las incertidumbres asociadas a las mediciones, e  $I \geq 0$ . Después de trabajar con las dos expresiones anteriores, y conjuntando las físicas clásica y cuántica,<sup>123</sup> se llega a que, efectivamente:

$$I \rightarrow 0$$

si y sólo si

$$\frac{\Delta x \Delta p}{xp} \rightarrow 1$$

<sup>122</sup> Cfr. Capítulos 4 y 5.

<sup>123</sup> Este sacrificio, o abuso, de la formalidad teórica al mezclar variables propias de la física clásica con las de la física cuántica ha sido únicamente con el ánimo de simplificar los cálculos. El resultado sería el mismo, pero mucho más engorroso y árido si seguimos la formalidad teórica.

con lo que se concluye que

$$\Delta x \Delta p = h.$$

Queda claro que PIH se relaciona estrechamente con la incertidumbre asociada a la medida pero, debido a la manera en que está declarado –en términos de un producto de incertidumbres– se vuelve imposible conocer dónde se localizará el objeto atómico en caso de pretender encontrarlo mediante medidas externas. En esto es en lo que reside la indeterminación asociada al principio. Es decir, el indeterminismo a que se refiere PIH es un indeterminismo asociado a la medida, lo que puede traducirse en un caso particular del indeterminismo filosófico. Y digo que es un caso particular porque si entendemos rigurosamente el determinismo como el conocimiento exacto que el sistema tendrá en cualquier instante en que queramos observarlo, entonces es evidente que el determinismo en la realidad es imposible, y en consecuencia, un determinismo tan riguroso como el determinismo laplaciano no es más que una quimera.

Y es que la exactitud en la naturaleza es un sueño debido a que no hablamos de exactitud en los procesos experimentales; no podemos ni debemos hacerlo, y menos si tenemos en mente que utilizamos instrumentos de medida que nos proporcionan un intervalo donde se puede encontrar el valor esperado de la lectura, y nada más; es decir, no sabemos –excepto por convención– dónde se encuentra exactamente el valor medido. Esto proporciona posibilidades de que el valor de la medida virtualmente se pueda localizar en varias partes del intervalo (es por este motivo que preferimos manejar la precisión en las mediciones). Visto de este modo, el determinismo laplaciano nunca será factible pues siempre habrá una posibilidad de que haya un comportamiento ligeramente distinto al predicho teóricamente. Así, podríamos decir que el determinismo no es más que un ‘indeterminismo localizado en una región’, pero es al hecho de encontrarse ubicado dentro de la región propuesta (por la incertidumbre de la medida) a lo que le asignamos un elevado grado de confiabilidad, y por eso depositamos en él nuestra confianza; así pues, debe quedar claro que el determinismo lo admitimos por convención.

El indeterminismo que aparece en PIH –y en general, en la teoría cuántica– se debe en buena medida a lo que anteriormente mencioné, es decir, se debe, en primera instancia, a la imposibilidad de localizar el objeto y, posteriormente, al desconocimiento de con qué

tipo de ente clásico –onda o partícula– estamos tratando.<sup>124</sup> Así pues, de lo que estamos hablando es de un determinismo de baja confiabilidad, que es a lo que llamamos indeterminación.

También fue notorio que el apoyo que PCB y su axiomatización de la dualidad le brindaron a PIH atemperó, por un lado, la contradicción interna subsumida en la propuesta teórica (en los postulados) respecto a que dos imágenes tradicionalmente excluyentes, partícula y onda, se superponen en un objeto cuántico único, mientras que por otra parte, convalidó la aparición de la indeterminación asociada a la medición, que a fin de cuentas es el motivo por el que no podemos conocer las características de los objetos cuánticos. Más aún, pues PCB, al dotar de coherencia lógica el desarrollo de la teoría dándole existencia real a los objetos duales, permitió disminuir el impacto del problema epistémico de la dualidad, al introducir la certeza cuántica de que los objetos atómicos son entes que gozan de características físicas únicas al considerarlos como partículas-ondulatorias –u ondas-corporculadas– y que además, estaremos seguros de encontrar la imagen deseada dependiendo del arreglo experimental al que sometamos al objeto original: si diseñamos un experimento para encontrar difracción, estaremos seguros que encontraremos ondas. Por el contrario, si deseamos cuantificar la interacción entre partículas, diseñaremos un experimento que muestre partículas. Así pues, PCB y PIH, dentro de una teoría indeterminista, proporcionan certezas: el primero, por declarar la dualidad y el segundo por declarar cierta la incertidumbre de la medida.

¿Dónde radica el problema entonces? El problema estriba en que desconocemos cómo son realmente los objetos atómicos, pues si bien la teoría justifica y predice una serie de resultados, y todos con gran dosis de acierto, no nos dice cómo son las cosas en la realidad, puesto que su entramado conceptual se halla cimentado en una estructura meramente operativa que proviene de supuestos admitidos como viables, y necesarios, para solucionar problemas experimentales, pero que no nos permiten hacer inferencias más profundas con el afán de buscar explicaciones; dicho de otra manera: además de los problemas prácticos asociados a las mediciones, los mismos postulados de la teoría suelen ser quienes nos impiden ir más allá, rehusándose, quizá involuntariamente, a explicar, en el sentido tradicional, cómo son las cosas, asumiéndolas solamente como algo que se da, pero sin saber por qué se da. Es en este sentido cuando la teoría adopta

---

<sup>124</sup> Podría pensarse que esto último podría subsanarse a costa de la precisión, abriendo el sistema para ver qué tipo de imagen tenemos; sin embargo, ese no es el caso pues lo que se pretende es conocer las variables cinemáticas y cinéticas de manera simultánea.

el rol de logro instrumental o algorítmico, y no el que habitualmente admitimos como un logro explicativo –en el sentido tradicional–.

Por ello, PIH y PCB cobran otra dimensión al interior de la teoría, pues son las bases que justifican la imposición de restricciones teórico-experimentales cuando se requiere explicar el por qué del funcionamiento natural. Y es que cuando la teoría comenzó a vertebrarse lógicamente, se cayó en cuenta que había un sinfín de lagunas teóricas que entrañaban problemas físico-filosóficos de apariencia insalvable; estas lagunas exigieron una revisión exhaustiva y meticulosa de la teoría, obligándola a introducir nuevos y variados argumentos que le dieran solidez –sino conceptual, al menos matemática– y sentido a lo que se proponía como solucionador de un problema, preocupándose inicialmente sólo en que hubiese concordancia entre la predicción y el experimento. Fue así que se introdujeron los inobservables, las ondas de probabilidad, la imposibilidad de una medición certera, etc. Esto fue lo que aseguró la postulación de PIH y de PCB, entre otros principios. Pero es con PIH que se justifica la imposibilidad de conocer completamente el estado que guarda un sistema atómico en un instante dado, dado que al impedir el conocimiento simultáneo de las variables conjugadas requeridas clásicamente para dar la descripción del sistema, se impide teóricamente alcanzar el conocimiento pleno del sistema; igualmente, al introducir la perturbación en las mediciones y asociarlas al trastrocamiento instantáneo del objeto en una partícula u onda, pone en entredicho el objetivismo tradicional de la física clásica.

Y es que con ello se pierde efectivamente la independencia entre el observador y lo observado, además de que, al desconocer qué tipo de ente físico es el objeto atómico, se niega el atributo de separabilidad e independencia de los objetos naturales, pues de algún modo coexistirán partícula y onda en cada objeto que se estudie. Aún cuando se asoció la “conversión” de una onda en un corpúsculo al manejar los “paquetes” de onda –la amplitud de la onda indica dónde localizaremos la partícula–, esto se vio más como una justificación matemático-ideográfica que como una solución verdaderamente física. Evidentemente, uno de los problemas que aparecen con esta justificación es cuestionar los conceptos clásicos de partícula y onda. Así, si admitimos las conceptualizaciones clásicas de partícula y onda, el problema epistémico asociado con el objeto de naturaleza dual subsiste, pues no sabemos qué tipo de objeto es la entidad cuántica, ni en virtud de qué se da tal “superposición” de imágenes, ni sabemos si efectivamente así es la naturaleza, y por qué es así; es decir, no podemos generar modelos explicativos situados

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

en el punto de vista clásico. La mecánica cuántica resuelve este problema de conceptualización empleando para ello su propio marco normativo, y da una explicación clara y convincente al resolver este problema matemáticamente mediante el manejo de la función  $\delta$  de Dirac. No obstante, y desde el punto de vista clásico, diríamos que la teoría cuántica deja este problema pendiente y no se preocupa por responderlo, concretándose con ser simplemente una teoría descriptiva, según ella misma lo acepta; y es que la teoría cuántica es una teoría que carece de conceptos sencillos o ideogramas que faciliten dar una explicación de cómo es la realidad, por lo que recurre sólo a “representarla” simbólicamente mediante expresiones matemáticas.

Y es que esta teoría, altamente exitosa desde su aparición, se ha negado sistemáticamente a decir cómo es la naturaleza, asegurando que nadie sabe cómo es, pues sólo damos fe de su comportamiento y las explicaciones dadas no son más que modelos, a los que equiparamos con los hechos reales, sin que sepamos si vale o no la representación. En la teoría clásica se admite esta representación ‘pictórica’ –como le llama Bohr–, representación que proviene de la experiencia y que posibilita la explicación, pues nos permite deducir acciones, sucesos e, inclusive, nuevos objetos físicos; pero en la teoría clásica no se encuentran objetos con comportamientos tan extraños como los de las entidades atómicas: superposición de entidades ajenas e irreconciliables, inexistencia de trayectorias continuas, imposibilidad de efectuar mediciones, etc. Es la dualidad de los objetos atómicos, según la teoría cuántica, la causante de que no sea posible establecer el carácter ideográfico de la física cuántica y propicia, indirectamente, la indeterminación. Y esta dualidad tangible y verídica es, en principio y bajo cualquier referencial teórico (sea clásico, relativista o cuántico), inexplicable. Lo único que verdaderamente prueba la existencia de un ente dual en las profundidades atómicas son los experimentos.

Sin embargo, bajo qué tenor, además de las evidencias experimentales, podríamos visualizar la dualidad de las entidades atómicas, creo que es relativamente simple, y para ello comparemos el comportamiento de un sistema físico macroscópico con el de un objeto atómico. En el caso clásico, encontramos características invariantes propias del sistema, y su movimiento a través del espacio-tiempo no modifica su estructura, puesto que las variables geométricas y cinemáticas, si bien están co-ligadas conceptualmente, se adscriben a objetos diferentes: aquéllas al espacio-tiempo y éstas al sistema, por lo que sigue el objeto no pierde su identidad. Esto trae como consecuencia la ‘inalterabilidad’ –por llamarle de algún modo– del evento. Quizá exista cierta discordancia en los resultados

que den los observadores del evento, pues dependerá de si éstos son inerciales o no, y bajo qué régimen de movimiento se encuentran, sea clásico o relativista. Sin embargo, esto es fácil de solucionar, puesto que los observadores harán los ajustes pertinentes al estado en que se encuentran y los resultados deberán ser aproximadamente los mismos. Pero lo que nos importa ahora es la independencia del sistema respecto del marco de referencia, donde vemos que no hay modificaciones o alteraciones físicas apreciables, es decir, una partícula seguirá siendo una partícula y una onda no perderá su atributo ondulatorio a menos que atravesase por un medio disipativo. Pero en el caso cuántico, tal y como se vió en el capítulo 5, esto ya no es así de sencillo, pues pareciera ser que el objeto estuviese ligado, de manera inextricable, al referencial, y por tanto, al observador. Pero si esto es así, entonces se vería que el espacio aparece y desaparece según ocurra o no el evento, al menos para el observador, lo cual es bastante complicado de admitir. Esto carece de sentido físico, pues el espacio está presente en todo momento, haya o no un observador presente. La mecánica soluciona este conflicto visto desde el punto de vista clásico, forzando la introducción de la entidad dual, al considerar que la onda es la que se propaga y que está ligada a las coordenadas espaciales –pues las partículas están localizadas– y es la partícula la que interactúa, por lo que introduce la proposición del paquete de ondas que es quien permite localizar a la partícula, aunque sea a costa de no poder medir simultáneamente la variable canónica conjugada; por ejemplo, si deseamos encontrar una partícula en determinada región del espacio por la que transita la onda, entonces se genera el paquete de ondas con una posición definida pero con una imprecisión en el momento, pues éste estará contenido en un intervalo de determinado valor; con esto, y tal como se ve, la teoría cuántica renuncia a la separación efectiva del objeto del marco de referencia del observador, concluyendo que, efectivamente, en tanto no discurra un objeto atómico por el espacio-tiempo del observador, éste considerará que aquél no existe, y con ello se derrumba la creencia de que existe un mundo objetivo.

Asimismo, la teoría propone que al ser imposible separar el espacio-tiempo del objeto, no es posible generar modelos o conceptos que permitan visualizar la naturaleza verdadera del ente cuántico, por lo que sólo queda como único recurso descriptivo la matematización de la naturaleza siendo, aun sea mediante este medio, lo que podemos vislumbrar de la realidad. En esto se basa la ‘representación abstracta matemática’ típica de la teoría cuántica. El problema es difícil, pues aun cuando admitimos que una teoría describe el acontecer real, a ciencia cierta no lo sabemos, pues ignoramos qué es la

realidad, o bien, desconocemos qué tanto estamos cerca de ella, o qué aceptamos como realidad. Es por eso que hasta el presente la teoría cuántica sigue manteniéndose como la mejor opción descriptiva a la hora de abordar la fenomenología subatómica.

Empero, quizá la respuesta esté, tal como lo maneje en el interior del trabajo, asociado con la estructura geométrica que guarda el espacio al deformarse con el paso de la materia, tal y como la gravitación einsteniana lo propone. El espacio lo podemos ver como una agente físico que experimenta determinados esfuerzos al soportar la materia –que le indica al espacio cómo debe curvarse para soportarla–, pero que le indica a ésta como debe moverse. Así pues, podemos pensar que si la materia se mueve rápidamente por el espacio (lo que pasaría con el tránsito de los electrones, por ejemplo, que típicamente alcanzan velocidades del orden de  $10^6$  m/s) entonces veríamos como si la gravedad (cuántica, en este caso) se deformara, siendo perturbada súbitamente, por lo que emitiría una onda que se mueve con una velocidad de fase igual a la de la luz ( $\approx 3 \times 10^8$  m/s), que sería la onda que se detectaría asociada al objeto atómico y que cuantificaríamos mediante la expresión de de Broglie. Evidentemente, la diferencia entre las velocidades podría deberse a la interacción entre la onda y el instrumento de medida, además de vincularse con el tiempo de retardo propio del instrumento. Si esto que propongo fuese válido, entonces PIH tendría que ajustarse, puesto que este principio marca la imposibilidad física que tenemos para escudriñar en las profundidades atómicas. Este estudio de los objetos atómicos se haría mediante la contrastación de otros resultados teóricos, quizá mediante el apoyo de otra constante fundamental natural, tal como la constante gravitacional, o la constante de Planck. En este sentido, se tendría al alcance de la mano otra alternativa teórica que explicaría el acontecer de las cosas.

En suma, considero que la indeterminación de PIH se deriva, por un lado, de una incertidumbre de índole estadística asociada al proceso de medición de un único individuo atómico que ha sido extraído de un conjunto de datos, y después, de la medición simultánea de las variables canónicas conjugadas requeridas para determinar el estado de movimiento de un sistema del sistema. Esto además, está intrínsecamente relacionado con la precisión del instrumental de medición, limitado por el cuanto de acción  $h$  como cota inferior. Es así que PIH se expresa como:

$$\Delta q \Delta p \geq h$$

donde  $\Delta q$  y  $\Delta p$  representan las incertidumbres de las variables dinámicas involucradas en el proceso de medición.

Por otra parte, es esta incertidumbre en la determinación simultánea de las variables, aparejada a la imprecisión de las medidas, lo que inevitablemente conduce a la indeterminación filosófica; esta indeterminación surge por la manera en la que matemáticamente aparece expresado PIH, siendo su ecuación quien prohíbe el conocimiento del estado que guarda el sistema al impedir la fijación simultánea de las incertidumbres asociadas a las variables canónicas; pero además, tal expresión matemática no sólo no coarta el conocimiento veraz del estado que guarda el sistema, sino que también niega la posibilidad de 'ver' qué tipo de imagen clásica: partícula u onda, es el objeto bajo estudio. Más aún: PIH también hace hincapié en el uso de la probabilidad para reconocer los objetos cuánticos, puesto que aquí la certeza deja de tener vigencia, por lo que sólo podemos hablar en términos probabilísticos del comportamiento de los objetos atómicos. Asimismo, PIH es uno de los impulsores de la matemática como un elemento imprescindible para la descripción del submundo cuántico, al limitar la medición y con ello, negar la posible explicatividad de la teoría, fomentando con ello una visión matemática-idealista de la realidad al proponer que ésta es de naturaleza matemática.

En lo que respecta a PIH y su relación con la causalidad, es justo reconocer que es prácticamente imposible obtener la expresión matemática de PIH por medios distintos al uso de la transformada de Fourier o sin apegarse al manejo que la misma teoría provee, lo cual es meritorio, sin duda alguna. Pero, el que en este momento no se pueda obtener tal ecuación por otros medios, no significa que siempre será así la relación entre PIH y el causalismo. Pienso que en un futuro no muy lejano, cuando se cuente con una mayor cantidad de datos empíricos o experimentos nuevos, y si se desarrollan nuevas áreas, tanto de la física<sup>125</sup> como de la matemática, será posible reinsertar el causalismo explícitamente dentro de PIH y por ende, dentro de la teoría cuántica, tal y como lo hace la teoría clásica. En este momento, la teoría cuántica continúa vigente con casi todos sus

---

<sup>125</sup> Esto porque la naturaleza no es inmutable y, en consecuencia, la física tendrá que adaptarse a las nuevas condiciones naturales, buscando cómo explicar lo que sucede. A fin de cuentas, eso es lo que hace la física, pues según Lea: (La física) "Cuando menos es tres cosas: un conjunto de ideas que describen el Universo en diversos niveles de detalle, un conjunto de métodos para usarlos y comprender al mundo que nos rodea, y un proceso dinámico y evolutivo para probar, ampliar y refinar ideas y métodos". (Lea, S. M. & Burke, J. R. (1998): *Física. La naturaleza de las cosas. Vol. I*; International Thomson Editores. México, 1999. p. xxiv.

preceptos iniciales que, cual impresionantes monolitos teóricos, son insustituibles y necesarios para ingresar a los ámbitos del micromundo.

El por qué PIH no contempla la causalidad puede deberse a varios factores, de donde sobresalen la elección de un único objeto para determinar su trayectoria y su comportamiento individual (que veríamos completamente azaroso) a partir del comportamiento (estadístico) grupal; la falta de datos y desarrollos teóricos más profundos y completos que permitan modificar la visión azarosa de la naturaleza y por último, por el estado que guarda la tecnología asociada con las técnicas experimentales. Quizá con el desarrollo de la ciencia y de la misma tecnología se logren afinar técnicas de medición más sofisticadas que permitan conocer con más detalle la trayectoria y el comportamiento de un objeto atómico tal como ocurrió con la velocidad de la luz (en este caso, es fácil pensar que Galileo pudo haberlo dudado, pues para él la velocidad de la luz, a pesar de ser finita, era extremadamente grande). Con esto estoy diciendo que no es que interceda por la causalidad sólo porque sí, sino porque me parece que la relación causal es uno de los pilares (o principios) más sólidos que tenemos a mano para buscar cómo explicar los sucesos. De hecho, tengo la convicción de que las ciencias tienen como principal obligación buscar las causas que nos permitan comprender y explicar nuestro mundo. Efectivamente, el determinismo quizá no sea más que el recurso metodológico de Popper, pero es lo que nos ha permitido estructurar teorías explicativas e impulsar el allegarnos de un conocimiento más ordenado y sistematizado respecto de cómo son las cosas, lo que ha contribuido al avance científico y tecnológico que tenemos. Me parece que una teoría totalmente azarosa es prácticamente inexistente.

Por otra parte, desde la posición que ocupo como físico, concedo razón al proceder de la física cuántica, y aunque se auto-considera como una teoría algorítmica, por mi parte creo que sí es, al menos matemáticamente hablando, explicativa, faltándole solamente la dosis imaginativa para serlo físicamente, lo cual es muy difícil de lograr porque nadie, y jamás, ha visto un objeto cuántico; si bien admitimos que estas entidades son reales,<sup>126</sup> porque los experimentos así lo demuestran persistentemente, tales evidencias empíricas son indirectas, por lo que inferimos que debe haber “algo” que las ocasione.<sup>127</sup> En este

---

<sup>126</sup> Lo que es habitual para los físicos; incluso de la Peña asegura que “la actitud que espontáneamente tiende a adoptar un científico, y más en particular un físico, al investigar la naturaleza, es realista. Sin embargo, aun las interpretaciones realistas de la mecánica cuántica suelen estar preñadas de un profundo subjetivismo” (de la Peña., *op. cit.*, p. 876).

<sup>127</sup> Nuevamente, de la Peña expresa: “Entre los elementos interpretativos tenemos, por ejemplo, el sentido que asignamos a la función de onda (describe una partícula o un ensemble), la decisión de si consideramos la

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

sentido, podría argumentarse que dichas entidades (que bien pueden ser sólo teóricas) son inobservables y sólo alcanzan a ser un concepto matemático más dentro de la estructura teórica, y quizá se tendría razón, pero entonces debemos buscar qué origina los fenómenos que observamos, y es más fácil admitir que las entidades existen en el mundo real a suponer que aparecen por cuestiones matemáticas, divinas, o algo parecido; es decir, ver continuamente los fenómenos con resultados semejantes nos lleva a concluir que hay objetos que existen aunque no los veamos, y que son capaces de producir tal fenomenología. Pero estamos buscando una explicación del por qué de las cosas, no nos contentamos con ser simples observadores...y damos esa explicación; que sea completamente matemática, es otra cosa. Sin embargo, así procedemos –y lo hemos hecho y lo seguiremos haciendo– en todas y cada una de las demás áreas de la física, y de la química, y de la biología, y de las ingenierías, pues la matemática es un lenguaje universal, frío, impersonal, objetivo y certero que nos conduce a la obtención de resultados que confrontamos con los hechos experimentales, y eso es una gran ventaja.

En suma, me queda claro que ni la ciencia ni la filosofía han demostrado de manera clara, completa, objetiva y fríamente, si el determinismo –o más bien, la relación causal– vale o no en la naturaleza, pues ambas posturas tienen argumentos de mucha valía a favor y en contra. El determinismo ha sido fieramente apologizado y duramente vilipendiado, y en el mismo talante se encuentra el indeterminismo; pero considero que son creencias personales las que hacen que una persona se incline hacia un lado u otro. Por mi parte, me inclino más por el determinismo, sobre todo porque creo que existen leyes naturales, así sea en los arcanos más profundos y oscuros del átomo, que son los que posibilitan el equilibrio y la estabilidad de los sistemas. No creo que esto atente contra la libertad humana, puesto que el determinismo al que me adhiero es aquél que está asociado con las incertidumbres de las mediciones, por lo que siempre queda un resquicio por donde pasar para elegir con libremente y con plena consciencia, aun cuando todo pudiera estar determinado de antemano (cosa que dudo). El determinismo sería entonces aquella región donde podemos encontrar el valor esperado, pero no donde lo aseguramos con toda exactitud. Por ejemplo, cuando alguien dice que su estatura, dada en centímetros es de 177 cm, lo que en realidad significa es que su estatura es de  $177 \pm 0.5$

---

aleatoriedad del movimiento de los electrones como irreducible (y concluimos de ahí que la naturaleza es acausal) o producto de nuestra ignorancia actual (y concluimos que la acausalidad es aparente y desaparecerá cuando se investiguen adecuadamente las causas hoy desconocidas del comportamiento aleatorio de los electrones), etc. Estos y varios otros son temas fundamentales en torno a los cuales se han generado y sostenido inacabables discusiones desde el nacimiento de la teoría cuántica.” (*Ibid.*, p. 40).

cm, o sea que su altura se encuentra en el intervalo [176.5, 177.5] cm. Como se ve, su estatura puede caer en un amplio rango de valores, pudiendo ser desde los 176.5 cm como valor mínimo hasta los 177.5 cm como valor máximo. ¿Dónde está entonces la exactitud? Es obvio que el determinismo, visto así, es puramente convencional, y nos suministra la suficiente información de cómo se puede comportar el sistema, o dónde podemos localizarlo, o en el caso de las decisiones humanas, dónde es posible hallar la elección, dependiendo de las circunstancias. En este sentido, nótese que PIH se asume como un principio que tiene como sustrato básico la incertidumbre de la medición, que es algo análogo a lo que he expuesto aquí. En suma, es claro que si bien la relación causal (en vez del determinismo) no se manifiesta abierta y contundentemente ligada a la ocurrencia del evento al que llamamos efecto, tampoco hay algo que nos indique que se pueda descartar completamente, por lo que la suposición de que la relación causal vale creo que se mantiene vigente, al menos para quien esto escribe.

Para concluir, no debemos perder de vista que aún con todo y que PIH y la mecánica cuántica propugnan la inexistencia del determinismo y de que son de esos casos raros en que como teoría se han mantenido al margen de decir cómo son las cosas y por qué son así, no por eso se les debe restar el mérito de ser un universo poblado de logros científicos, tanto en el aspecto teórico-predictivo como en el ámbito experimental; y es que tanto PIH como la teoría cuántica se apoyan firmemente en un sólido y elegante edificio teórico que ha venido a suplantar, en el mundo de lo muy pequeño, la habitual conceptualización ideográfica de la física clásica que posibilitaba la explicación de la realidad, y que hoy, ante la carencia de figuras imaginativas, queda envuelta en el misterio.

No obstante, a pesar de tantas y tantas objeciones, la estructura lógico-matemática de la mecánica cuántica sigue cosechando éxitos, cumpliendo una centuria de vida y prosigue su camino, explorando continuamente las entrañas del micromundo para constituirse en la teoría más exitosa y confiable de todos los tiempos, y por lo que se ve, podría continuar así, siendo una teoría perpetuamente actual que difícilmente envejecerá, pues parece haber sellado un pacto con la eternidad.

Ojalá y siga así de fascinante.

## BIBLIOGRAFÍA

- Agazzi, E. (1978): *Temas y problemas de filosofía de la física*; Ed. Herder. Barcelona.
- Alonso, M. y Finn, E. J. (1968): *Fundamentos cuánticos y estadísticos; Vol. III*; Addison-Wesley Iberoamericana. México. 1990.
- Arnold, V. I. (1978): *Graduate Texts in Mathematics: Mathematical Methods of Classical Mechanics*; Springer-Verlag. New York, Heidelberg, Berlin.
- \_\_\_\_\_, (1980): *Mathematical Methods of Classical Mechanics (Graduate texts in Mathematics: 60)*; Springer-Verlag. New York.
- Baird, D. C. (1991): *Experimentación. Una introducción a la teoría de mediciones y al diseño de experimentos*; Prentice-Hall Hispanoamericana, S. A. México, 1991.
- Barger, V. & Olsson, M. (1973): *Classical Mechanics. A Modern Perspective*; McGraw-Hill Series in Fundamentals of Physics: An undergraduate textbook program. McGraw-Hill Book Company. USA. 1973.
- Bartle, R. G. (1980): *Introducción al Análisis Matemático*; Ed. Limusa, S. A. de C. V. México, 1991.
- Bernstein, J. (1991): *Perfiles cuánticos. Un análisis de la Física Cuántica*. McGraw-Hill/Interamericana de México. México. 1992.
- Beuchot, M. (1987); *Conocimiento, Causalidad y Metafísica*; Universidad Veracruzana, Xalapa; México.
- Bird, A. (1998).pdf: *Philosophy of Science*; Fundamentals of Philosophy. Series Editor: John Shand. University of Edinburgh. Routledge. Taylor & Francis Group.
- \_\_\_\_\_, (1959): *Causalidad y Azar en la Física Moderna*; Problemas Científicos y Filosóficos. Dirección General de Publicaciones. UNAM. México.
- Bohm, D.: *Causality and chance in modern physics*; Taylor & Francis e-Library; 2005.
- Bohr, N. (1963): *Essays 1958-1962 on Atomic Physics and Human Knowledge*; Interscience Publishers (Richard Clay and Company, Ltd). G. B. 1963.
- Bohr, N. (1964); *Física atómica y conocimiento humano*; Aguilar, S. A. de Ediciones; España.

- Borel, E. (1996); *Probabilidad y Errores*; Colección Metronómica, Serie Metrología Técnica, Limusa Noriega Ed.
- Brillouin, L. (1969): *La información y la incertidumbre en la ciencia*; Problemas científicos y filosóficos. UNAM. 1969.
- Bronowski, J. (1962): *El ascenso del hombre*; Fondo Educativo Interamericano. México. 1962.
- Bunge, M; Halbwachs, F; Kuhn, Th. S.; Rosenfeld, L. & Piaget, J. (1977): *Las Teorías de la causalidad*; Ediciones Sígueme; España.
- Butterfield, J. & Earman, J. (2007).pdf: *Philosophy of Physics, Part A*; Elsevier B. V.; U. K. 2007. Adobe Read.
- Butkov, E. (1968): *Mathematical Physics*; Addison-Wesley Publishing Company; USA.
- Cadenas, G. Y. (2004).pdf: *Epistemología, Ontología y Complementariedad en Niels Bohr*; Tesis doctoral; Facultad de Filosofía; Universidad Complutense de Madrid.
- CNM-MED-PT-0002. (1994): *Guía BIPM/ISO para la expresión de la incertidumbre en las mediciones*. Centro Nacional de Metrología. México.
- De Broglie, L. V. (1925): *On the theory of quanta*; Tesis Doctoral.pdf. AFK, 2004.
- \_\_\_\_\_ & Fok, V. A. (1987): *Examen de la Mecánica Cuántica*; Seminario de Problemas Científicos y Filosóficos; Colección: Suplementos 29; UNAM. México.
- De la Peña, Luis (1979): *Introducción a la mecánica cuántica. 3ª. Ed.*; FCE-UNAM. México. 2010.
- De Lira, B. J. (2008): *Karl Popper: Controversias en Filosofía de la Ciencia*; UNAM-UAA. México. 2008.
- Dickson, M. (2007): *Non-Relativistic Quantum Mechanics*, en *Philosophy of Physics, Part A. Handbook of the Philosophy of Science*; Edited by Butterfield, J. & Earman, J. Elsevier, North-Holland.UK. 2007.
- Earman, J. (1986).pdf: *A primer on determinism*; D. Reidel Publishing Company; Netherlands.
- Einstein, A. (1979): *Notas autobiográficas*; Alianza Editorial. Madrid.
- Eisberg, R. y Resnick, R. (1997): *Física cuántica. Átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas*; Limusa Noriega Editores; México, 1997.

- Félix Valdez, J. (2001): *La mecánica cuántica*. 1a Ed.; Colección Nuevo Siglo. Serie Ciencia y Tecnología. Universidad de Guanajuato. SEP. 2001
- Fernández-Rañada, A. (2004): *Ciencia, incertidumbre y conciencia. Heisenberg*; Serie: Científicos para la Historia; Nivola libros y Ediciones, S. L.; España.
- Ferrater Mora, J. (1964).pdf: *Diccionario de filosofía. Tomo I: A-K*; Ed. Sudamericana. Buenos Aires.
- Feynman, R., Leighton, R. B. & Sands, M. (1965): *Física. Volumen III: Mecánica Cuántica*; Addison-Wesley Iberoamericana, S. A.; USA. 1987.
- Fishbane, P. M.; Gasiorowicz, S. & Thornton, S. T. (1993): *Física para Ciencias e Ingeniería; Vols. I y II*; Prentice-Hall Hispanoamericana S. A. México, 1994.
- French, A. P.(1988): *Relatividad especial. MIT Physics course*; Ed. Reverté; Barcelona. Reimp. 2002.
- Gamow, G. (1971): *Biografía de la física*; Biblioteca General Salvat; Salvat Editores; España, 1971.
- García-Colín Scherer, L. (1970): *Introducción a la termodinámica clásica. 3ª Ed.*; Ed. Trillas. México. 1986.
- Godunov, S. K. (1984): *Ecuaciones de la Física Matemática*; 2a Edición (Traducción al Español); Editorial Mir. Moscú.
- Grenet, P. B. (1963): *Ontología. Curso de Filosofía tomista, Vol. 3*; Ed. Herder. Barcelona. 1985.
- Griffiths, D. J. (2005): *Introduction to Quantum Mechanics, 2<sup>nd</sup> Ed.*; Pearson Prentice Hall. USA.
- Hacking, I (1995); *La domesticación del azar (La erosión del determinismo y el nacimiento de las ciencias del caos)*; Ed. Gedisa. España.
- Hecht, E. & Zajac, A. (1974): *Óptica*; Fondo Educativo Interamericano, S. A.; USA. 1977.
- Heisenberg, W. (1955): *La imagen de la Naturaleza en la física actual*; Planeta-Agostini; España. 1994.
- \_\_\_\_\_, (1985); *Encuentros y conversaciones con Einstein y otros ensayos*; El Libro de Bolsillo. Alianza Editorial; España. Artículo: *La tradición en la ciencia*.
- Hilbert, D. (1993): *Fundamentos de las matemáticas*; Colección Mathema; Fac. de Ciencias. UNAM. 1993.

- Hume, D. (2004): *Investigación sobre el entendimiento humano*; Ágora de Ideas, Ediciones Istmo, S. A. España, 2004.
- Jackson, J. D. (1973): *Classical Electrodynamics, 2nd Ed.*; John Wiley & Sons, USA. 1975.
- Klein, M. V. & Furtak, T. (1985): *Optics. 2nd Ed.*; John Wiley & Sons, USA. 1986.
- Kosso, P. (1998): *Appearance and Reality. An introduction to the Philosophy of Physics*; Oxford University Press; USA, 1998.
- Kuhn, T. S. (1978): *La Teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica, 1894–1912*; Ed. Alianza Editorial. España.
- \_\_\_\_\_, (2006): *La Estructura de las Revoluciones Científicas*; FCE; México.
- Lagemann, R. T. (1963): *Ciencia Física. Orígenes y Principios*; Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana. México, 1968.
- Lahiri, A. & Pal, P. B. (2000): *A First Book of Quantum Field Theory. 2nd. Edition*; Alpha Science International Ltd.; Harrow, U. K.
- Lakatos, I. [1981]: *Matemáticas, ciencia y epistemología*. Alianza Universidad. España.
- Landau, L. & Lifshitz, E. (1974): *Curso abreviado de Física Teórica. Libro 1: Mecánica*; (Traducción al Español); Editorial Mir. Moscú.
- \_\_\_\_\_, (1974): *Curso abreviado de Física Teórica. Libro 2: Mecánica Cuántica*; (Traducción al Español); Editorial Mir. Moscú.
- \_\_\_\_\_, (1967): *Física Teórica, Vol. 3. Mecánica Cuántica (Teoría no-relativista)*; Ed. Reverté, S. A. Barcelona. 1967.
- Lea, S. M. & Burke, J. R. (1998): *Física. La naturaleza de las cosas. Vol. I*; International Thomson Editores. México, 1999.
- \_\_\_\_\_, (1998): *Física. La naturaleza de las cosas. Vol. II*; International Thomson Editores. México, 1999.
- Leite Lopes, J. (1977): *Introducción a la Electrodinámica Cuántica*; Ed. Trillas. México.
- Mach, R. (1977); *Física para poetas*; Siglo XXI Editores. México
- Marías, J. (1941): *Historia de la filosofía. 30ª Ed.*; Biblioteca de la Revista de Occidente. Madrid. 1978.
- Marion, J. B. (1980): *Classical Electromagnetic Radiation; 2nd Edition*; Harcourt Brace Jovanovich, Inc. USA.

- Marmasse, C. (1975): *La paciente historia del átomo*; SEP/SETENTAS. México.
- Marsden, J. E. & Tromba, A. J. (1976): *Cálculo Vectorial*; Addison-Wesley Iberoamericana S. A. México, 1987.
- Martínez, S. (1997): *De los efectos a las causas*; Seminario de Problemas Científicos y tecnológicos; UNAM. México, 1977.
- \_\_\_\_\_, (2001): *De los efectos a las causas. Sobre la historia de los patrones de explicación científica*; UNAM-Paidós.
- Matthews, P. T.:(1968): *Introduction to Quantum Mechanics; Third Ed.*; Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd.; New Delhi. 1974.
- More, L. T. (1934): *Isaac Newton, A Biography*; Dover. USA.
- Nagel, E. (1991): *La estructura de la ciencia. Problemas de la lógica de la investigación científica*; Ediciones Paidós. España.
- Newton, I. (1686): *Escolio de los Philosophiae naturalis principia mathematica*; en: Einstein, A., Grünbaum, A., Eddington, A. S. y otros (1978): *La teoría de la relatividad. Sus orígenes e impacto sobre el pensamiento moderno*; Selección de Williams, L. Pearce; Alianza Editorial. Madrid. 1978.
- \_\_\_\_\_, (1729).pdf: *Mathematical principles of natural philosophy and his system of the world. Vols. II & III: The system of the world*. University of California Press. USA.
- \_\_\_\_\_, (1987): *Principios matemáticos de la filosofía natural, 2. Libro II y Libro III*; Alianza Editorial, S. A.; Madrid.
- Nieto, S. J. I. (1978): *Introducción a los Espacios de Hilbert*; Monografía No. 19, Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico. OEA. 1978.
- Oerter, R. (2008): *La teoría de casi todo. El modelo estándar, triunfo no reconocido de la física moderna*; Fondo de Cultura Económica. México.
- Pauli, W. (1955): *Essays dedicated to Niels Bohr on the occasion of his seventieth birthday*; Pergamon Press Ltd., London, 1955.
- Penrose, R. (1999): *Lo grande, lo pequeño y la mente humana*; Ed. Akal; España, 2006.
- \_\_\_\_\_, (2004): *El camino a la realidad. Una guía completa de las leyes del universo*; Random House Mondadori, S. A. México, 2007.
- Platón; *Diálogos de Platón. Teetetes o de la ciencia*; 15ª. Edición; Editorial Porrúa, S. A.; México, 1975.

- Plotnitsky, A. (2006).pdf: *Reading Bohr: Physics and Philosophy*; Fundamental Theories of Physics; Springer. USA.
- Popper, K. R. (1956): *El universo abierto. Un argumento a favor del indeterminismo. Post Scriptum a la Lógica de la Investigación Científica. Vol. II*; Ed. Tecnos; Madrid, 1996.
- \_\_\_\_\_, (1956): *Teoría cuántica y el cisma en física. Post Scriptum a La lógica de investigación científica, Vol. III*; Ed. Tecnos; Madrid, 1996.
- \_\_\_\_\_, (1972): *Conocimiento Objetivo*; Ed. Tecnos. Madrid. 1982.
- \_\_\_\_\_, (1982): *Conocimiento Objetivo. Un enfoque evolucionista*; Ed. Tecnos. Madrid
- \_\_\_\_\_, (1982): *La lógica de la investigación científica*; Editorial Tecnos. España.
- \_\_\_\_\_, (1990): *Un mundo de propensiones*; Ed. Tecnos; Madrid, 1992.
- \_\_\_\_\_, (1996): *El universo abierto. Un argumento a favor del indeterminismo. Post Scriptum a la Lógica de la Investigación Científica. Vol. II.*; Ed. Tecnos. Madrid.
- Powell, J. L. & Craseman, B.: *Quantum Mechanics*; Addison-Wesley, Reading, USA, 1961.
- Psillos, S. (2007).pdf: *Philosophy of science A-Z*; Edinburgh University Press; G. B.
- Resnick, R.; Halliday, D. & Krane, K. S. (2002); *Física, Vol. 1*; CECSA; México.
- \_\_\_\_\_, (2002): *Física, Vol. 2*; CECSA. México.
- Rolleri, J. L. (2009): *Probabilidad, causalidad y explicación*; Serie Filosofía, Universidad Autónoma de Querétaro. México.
- Russell, B. (1931): *La perspectiva científica*; Ed. Ariel, S. A. España. 1974.
- \_\_\_\_\_ (1935): *Religión y Ciencia*; Fondo de Cultura Económica. México. 1973.
- Saxon, D. S. (1968): *Elementary Quantum Mechanics*; Holden-Day, USA.
- Sears, F. W. (1958): *Mecánica, Movimiento Ondulatorio y Calor*; Ed. Aguilar. España. 1965.
- Stroud, B. (1995): *Hume*; Colección Filosofía Contemporánea; Instituto de Investigaciones Filosóficas, UNAM; México.
- Struick, D. J. (1994): *Historia concisa de las matemáticas*; 2ª. Reimpresión; IPN. México.

- Swokowski, E. W.: *Cálculo con Geometría analítica*; Grupo Editorial Iberoamerica. México. 1982.
- Symon, K. R. (1977): *Mecánica*; Colección Ciencia y Técnica. Ed. Aguilar; España.
- Tapia-Moreno, F. J. (2002).pdf: *Apuntes de historia de las matemáticas. Vol. 1*; mayo, 2002. Inst. Mats. Universidad de Sonora.
- Targ, S. (1971): *Curso breve de Mecánica Teórica. 5ª Ed.*; Ed. Mir. URSS. 1986.
- Taylor, E. F. & Wheeler, J. A. (1982): *Space Time Physics. Introduction to special relativity*; 2ª. Ed.; W. H. Freeman & Co
- Whitrow, G. J. (1967); *Einstein. El hombre y su obra*; Siglo XXI, Ed. México, 1990.
- Woodward, J. (2003): *Making things happen. A theory of causal explanation*; Oxford University Press. USA, 2003.
- Zemansky, M. W. (1973): *Calor y Termodinámica*; Ed, Aguilar. España. 1973.

## Referencias

### Artículos:

- Adem, J. C. (1984): *On the prediction of mean monthly ocean temperatures*; en: Imagen y Obra escogida; Colección México y la UNAM; UNAM. Vol. 3. pp. 19-39.
- \_\_\_\_\_ (1984): *On the theory of the general circulation of the atmosphere*; en: Imagen y Obra escogida; Colección México y la UNAM; UNAM. Vol. 3. pp. 41-54.
- Bertotti, B.; *The Later work of E. Schrödinger*. Studies in History and Philosophy of Science. Vol 16. Number 2. June, 1985. Pergamon Press Ltd; Great Britain. pp. 83-100.
- Bohr, N. Physics Review, Vol. 48, 1935, p. 696.
- Cushing, J. T.; *Is there just one possible world? Contingency vs the Bootstrap*. Studies in History and Philosophy of Science. Vol 16. Number 1. March, 1985. Pergamon Press Ltd; Great Britain. pp. 31-48.
- Gibilisco, P.& Isola, T.; *Uncertainty principle and quantum Fisher Information*. Ann. Inst. Stat. Math. 59. pp. 147-159.

- Giribet, G. E. (2005).pdf: *Sobre el Principio de Incertidumbre de Heisenberg entre tiempo y energía: una nota didáctica*; en: Revista Mexicana de Física; junio, 2005, Vol. 51. Sociedad Mexicana de Física. pp. 23-30.
- Gröchenig, K.; *An Uncertainty Principle related to the Poisson summation formula*; Studia Mathematica 121 (1). ICM. 1996.
- Guzmán, R. (2005).pdf: *¿Existen los electrones?*; Revista Colombiana de Filosofía de la ciencia. Vol. VI. Nos. 12 y 13. pp. 143-154.
- Hacking, I. (1996): *¿Qué es el realismo científico?*, en: *Representar e intervenir*, Paidós-UNAM. México.
- Martínez M. S.; *El azar en la mecánica cuántica: de Bohr a Bell*. Crítica, Revista Hispanoamericana de Filosofía. Vol. XXIII, No. 69 (diciembre 1991): pp. 137-154.
- \_\_\_\_\_; *La objetividad del azar en un mundo determinista*; en Crítica, Revista Hispanoamericana de Filosofía; Vol. XXII, No. 65 (agosto, 1990): pp. 3-21.
- Medina Rivera C. Salvador (1995): *Prácticas de Laboratorio de Física. Manual de Teoría de Errores*. Centro de Ciencias Básicas; UAA. 1995.
- Moshinsky, M. (1984): *The Harmonic Oscillator in Modern Physics: From atoms to Quarks*; en: Imagen y Obra escogida; Colección México y la UNAM; UNAM. Vol. 52. pp. 1-93.
- Ripa, P. (1992): *Sistemas hamiltonianos singulares. I: Planteamiento del caso discreto, Teorema de Noether*. Revista Mexicana de Física 38, Vol. 6, 1992.
- Rolleri, J. L. (2007); *La teoría de la Explicación Causal de Salmon y la Mecánica Cuántica*; Crítica, Revista Hispanoamericana de Filosofía, Vol. 39, No. 116.
- Salart, D. et al: *Testing the speed of 'spooky action at a distance'*, en Nature 454 (2008).
- T. N. Palmer. (2009).pdf: *The invariant set postulate: a new geometric framework for the foundations of quantum theory and the role played by gravity*; en: Physics org. Proceedings of the Royal Society A. doi:10.1098/rspa.2009.0080.
- Enciclopedia Encarta; Microsoft 2000.
- Enciclopedia Católica. *Libre voluntad*.
- *Enciclopedia Hispánica*; Encyclopaedia Britannica Publishers, Inc. USA. 1995-1996.
- *La Jornada*. 8 de Octubre de 2008.
- El Universal - Ciencia.mht. www.eluniversal.com.mx.17/Noviembre/2010

- Salart, D. *et al*: *Testing the speed of 'spooky action at a distance'*, en Nature 454 (2008).

## Websites:

- <http://ciencia.astroseti.org/hawking/>
- <http://ec.aciprensa.com//librevoluntad.htm>
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Annalen\\_der\\_Physik](http://en.wikipedia.org/wiki/Annalen_der_Physik)
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Causa\\_\(desambiguaci%C3%B3n\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Causa_(desambiguaci%C3%B3n))
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Desigualdad\\_de\\_Bell](http://es.wikipedia.org/wiki/Desigualdad_de_Bell)
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Estoicismo>
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Galileo\\_Galilei](http://es.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei)
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Historia\\_de\\_China](http://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_China)
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Interpretaci%C3%B3n\\_de\\_Copenhague](http://es.wikipedia.org/wiki/Interpretaci%C3%B3n_de_Copenhague).
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Postulados\\_de\\_la\\_Mec%C3%A1nica\\_Cu%C3%A1ntica](http://es.wikipedia.org/wiki/Postulados_de_la_Mec%C3%A1nica_Cu%C3%A1ntica)
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Precisi%C3%B3n\\_y\\_exactitud](http://es.wikipedia.org/wiki/Precisi%C3%B3n_y_exactitud)
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Precisi%C3%B3n\\_y\\_exactitud](http://es.wikipedia.org/wiki/Precisi%C3%B3n_y_exactitud); (Wikipedia, la enciclopedia libre).
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Relaci%C3%B3n\\_de\\_indeterminaci%C3%B3n\\_de\\_Heisenberg](http://es.wikipedia.org/wiki/Relaci%C3%B3n_de_indeterminaci%C3%B3n_de_Heisenberg)
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa\\_del\\_Caos](http://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa_del_Caos).
- <http://euler.mat.uson.mx/depto/publicaciones/apuntes/pdf/1-2-6-noether.pdf>.
- <http://forum.lawebdefisica.com/threads/4062-Lo-ultimo-sobre-el-colapso-de-la-funcion-de-onda>
- [http://it.wikipedia.org/wiki/Ecfanto\\_di\\_Siracusa](http://it.wikipedia.org/wiki/Ecfanto_di_Siracusa)
- <http://mecfunnet.faii.etsii.upm.es/Xitami/webpages/euler/wwwqm.html>
- <http://personales.ya.com/casanchi/fis/hamilto01.htm>
- <http://webs.morningside.edu/slaven/Physics/uncertainty/uncertainty7.html>
- [http://www.antroposmoderno.com/antro-articulo.php?id\\_articulo=152](http://www.antroposmoderno.com/antro-articulo.php?id_articulo=152).
- <http://www.astrocosmo.d/biografi/b-m-planck.htm>
- <http://www.biografiasyvidas.com/biografia/l/leucipo.htm>
- <http://www.dpye.iimas.unam.mx/PresentacionesJornadas2007/IgnacioMendez.pdf>.

- [http://www.La construcción científica de la realidad\\_ Determinismo e indeterminismo\\_ El postulado de la objetividad.htm](http://www.La_construcción_científica_de_la_realidad_Determinismo_e_indeterminismo_El_postulado_de_la_objetividad.htm)
- <http://www.monografias.com/trabajos16/nicolas-copernico/nicolas-copernico.shtml#COSMOL>
- [http://www.oposinet.com/filosofia/temas/oposiciones\\_filosofia\\_T10.php](http://www.oposinet.com/filosofia/temas/oposiciones_filosofia_T10.php).
- <http://www.springerlink.com/content/j1933721063865l>



TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS



TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

## Acercamiento al indeterminismo científico

C. SALVADOR MEDINA RIVERA  
JOSÉ DE LIRA BAUTISTA

### RESUMEN

El determinismo es la postura epistémica que sostiene que todo lo que acontece en el mundo está predeterminado previamente. Esto está intrínsecamente relacionado no sólo con las ideas religiosas y metafísicas, sino también con ideas científicas –principalmente en física, sobre todo aquellas que describen los fenómenos desde un punto de vista macroscópico y a bajas velocidades–. Tal punto de vista ha sido sumamente criticado, sobre todo por la postura denominada indeterminismo.

En el presente trabajo se examinará, brevemente, en qué consisten el determinismo y el indeterminismo, haciendo énfasis en el indeterminismo científico y buscando su relación con el Principio de Incertidumbre de Heisenberg, que aparece en la mecánica cuántica.

### INTRODUCCIÓN

Es admisible pensar que en los comienzos de la historia humana, el hombre, para intentar explicar el acontecer natural mediante métodos observacionales aún deficientes, no tuviera más opción que acudir a la magia, los ritos y la religión, por ser lo más inmediato y accesible para abordar la ocurrencia de las cosas, aun cuando con ello

se creyera que el mundo es gobernado por entidades poderosas que deciden qué, cuándo, cómo y para qué suceden las cosas en el mundo. Esta manera de proceder generó explicaciones insatisfactorias donde los resultados de los eventos no siempre concordaban con lo predicho. Fue precisamente esta necesidad de prever con mayor precisión los hechos venideros lo que sembró el interés por buscar una explicación del comportamiento natural. Este deseo por conocer los hechos futuros germinó de manera continua en todas las sociedades, provocando con ello una mejora sensible en las técnicas de observación, recolección, ordenamiento y análisis de los datos, condujo a que algunas civilizaciones alcanzaran grandes logros explicativos que evidenciaron la regularidad de varios fenómenos naturales, destacándose por su trascendencia, los movimientos periódicos. En este rubro destacan los babilonios y los egipcios, aunque fueron los griegos quienes hicieron de la observación un arte y, aun cuando mantenían vigente una cosmovisión mítica y teológica, fueron la reflexión y la abstracción racional los verdaderos motores de conocimiento que los llevaron a la búsqueda de una explicación de cómo son las cosas.

Con el estudio de las regularidades naturales, la idea de que el mundo está obligado a seguir determinados procesos va ganando terreno dentro de la visión cosmogónica de los distintos pueblos, y con ello, se impone lenta, pero inexorablemente, una concepción determinista de la naturaleza. Esta visión permite predecir, basándose en las condiciones actuales, lo que ocurrirá con el mundo natural en un tiempo futuro, así sea aproximadamente. Estos éxitos predictivos son los que permiten afinar el determinismo en un pensamiento científico incipiente, que emplea hipótesis experimentales como argumentos explicativos.

Ahora bien, la noción de determinismo queda plasmada en la literatura griega, en donde la vida y evolución de los personajes están perfectamente "determinadas" por la trama y las características físicas y psicológicas asignadas por el autor. Así, un lector de la obra puede comprender cómo las vidas de los personajes siguen una senda

trazada de antemano, es decir, su vida está “determinada”. Quizá el caso más conocido sea la tragedia de Edipo, quien después de conocer por el Oráculo de Delfos lo que le deparaba el destino, busca infructuosamente evadir su sino para caer, irremisiblemente, en él. Posteriormente, el vocablo se trasladó a la filosofía, la ciencia y a la esfera humana en general, donde se le vinculó con la libertad.<sup>1</sup> Aun así, y sin tener una definición única, precisa y clara, convencionalmente admitimos “el determinismo como la doctrina según la cual todos y cada uno de los acontecimientos del universo están sometidos a las leyes naturales. Estas leyes son de carácter causal”.<sup>2</sup> Entendido el determinismo en términos de leyes naturales ha sido demasiado cuestionado, debido a la objeción que existe respecto a la validez del causalismo o a las dudas de si las leyes naturales existen realmente o no son más que una muleta que apoya al método científico, por lo que el determinismo no es más que un concepto ambiguo. Earman señala, en este sentido, que

Perhaps the most venerable of all the philosophical definitions holds that the world is deterministic just in case every event has a cause. The most immediate objection to this approach is that it seeks to explain a vague concept –determinism– in terms of a truly obscure one –causation–.<sup>3</sup>

Hay que considerar, sin embargo, si efectivamente la tesis de que la naturaleza se halla sometida a ciertos patrones de comportamiento

- 1 Por ejemplo, Popper hace el señalamiento de que el determinismo coarta la libertad, al proferir: “Hasta casi 1927 los físicos, salvo contadas excepciones, creían que el mundo era un inmenso reloj sumamente preciso. Descartes [...] describió el reloj como algo mecánico: toda causalidad era empuje. Tal fue la primera y más clara teoría de la causalidad. Tiempo después, aproximadamente a partir de 1900, el mundo pasó a ser considerado como un reloj eléctrico. Mas en ambos casos se consideraba que el mundo era un reloj sumamente preciso. [...] En tal mundo no quedaba lugar para las decisiones humanas. Nuestras sensaciones de estar actuando, planeando, comprendiéndonos mutuamente, eran ilusorias. Pocos filósofos, con la gran excepción de Peirce, osaron disputar esta concepción determinista. En 1927, con Werner Heisenberg, la física cuántica experimentó un gran cambio. Quedó claro que procesos ínfimos convertían al reloj en algo impreciso: existían indeterminaciones objetivas.” (Popper, K. (1990): *Un mundo de propensiones*; Ed. Tecnos. Madrid. 1992. pp. 22-23).
- 2 Ferrater Mora, J. (1964).pdf: *Diccionario de filosofía. Tomo I: A-K*; Ed. Sudamericana. Buenos Aires. p. 418.
- 3 Earman, J. (1986).pdf: *A primer on determinism*; D. Reidel Publishing Company, Netherlands. p. 5

que dan pie a las regularidades observadas en la naturaleza (las regularidades estadísticas) admite una justificación plausible, bien sea desde el punto de vista de la física o no, pues es difícil argumentar tanto a favor del determinismo como en contra de él. En todo caso, Psillos aduce:

Determinism: Intuitively, the view that the past uniquely determines the future. Laplace characterized determinism as lawful predictability. [...] Freed from the epistemic notion of predictability, determinism is taken to be a claim about universal causation: each and every event has a fully sufficient nomological condition (i.e., a sufficient cause in accordance with universal laws). Determinism, then, denies the existence of objective chance in the world: all events are determined to happen with either probability one or zero.<sup>4</sup>

No hay, por tanto, una definición única para el determinismo, aunque este autor también resalta que dicho término descansa en la relación causal y converge hacia las leyes naturales, las cuales se introducen mediante un proceso inductivo derivado de la observación de cómo un conjunto de eventos naturales se comporta, aproximadamente, de manera similar bajo las mismas circunstancias. Esta regularidad surgida de la observación se eleva a rango de ley y se asume, en principio, como evidente para todos los observadores. Dicha ley, en términos concisos y puntuales, no es más que la expresión verbal que enuncia la regularidad estadística llevada al límite, es decir,

si:  $P_n$ ,  
 con:  $n$  y  $n = \text{un número entero}$ ,  
 entonces:  
 $P_n$ , bajo las mismas condiciones,

con lo que se enuncia la constancia y repetitividad de un suceso de manera (aproximadamente) idéntica a la ocurrencia de los sucesos previos, modificando su estado de ocurrencia sólo bajo la acción, deliberada o accidental, de un agente –sea externo o no– que no se ciña a las condiciones estipuladas.

4 Psillos, S. (2007).pdf. *Philosophy of science A-Z*; Edinburgh University Press; G. B. p. 67.

Ahora bien, la regularidad estadística tiene dos vertientes: por un lado, nos lleva a un determinismo causalista, que es aquél en que si después de considerar un número muy grande de observaciones bajo condiciones constantes e iguales, notamos que éstas son estables o se mantienen sin variabilidad estadística significativa, decimos que tenemos una probabilidad de ocurrencia unitaria o un evento certero.<sup>5</sup> En caso de que esto no se satisfaga, es decir, si se presenta variabilidad estadística significativa, podremos hablar de un determinismo probabilista.

Así, parece claro que las leyes naturales son extrapolaciones justificadas lógicamente mediante un proceso de inducción que poseen un contenido de verdad no nulo sustentado en evidencias empíricas y que permiten establecer principios generales y fundamentales que vinculan lo observado individualmente con el conjunto de eventos similares. Es decir, asumimos que al observar un evento que se ha comportado de una manera particular bajo determinadas condiciones, entonces las observaciones de la misma clase de eventos, bajo las mismas condiciones, se comportarán de la misma manera. Esta generalización, y simplificación, del comportamiento de los sucesos nos permite representar simbólicamente el cúmulo

<sup>5</sup> Un fenómeno aleatorio, fortuito o al azar, es un fenómeno empírico que se caracteriza por la propiedad de que, al observarlo bajo determinado conjunto de condiciones, no siempre se obtiene el mismo resultado, es decir, no existe regularidad determinista, sino que los diferentes resultados ocurren con regularidad estadística; esto lleva a decir que existen números entre los valores 0 y 1 que representan la frecuencia relativa con la que se observan los diferentes resultados en una serie de repeticiones independientes del fenómeno. Decimos entonces que la probabilidad de que ocurra el evento A, denotada por  $P(A)$ , con A elemento de un espacio muestral  $\Omega$ , es un valor que se encuentra entre los valores 0 y 1. En términos probabilísticos, la certeza -o evento seguro- está dado por  $P(\Omega) = 1$ , mientras que el evento imposible está dado por  $P(A) = 0$ . Más aún, si se tiene una serie muy grande de pruebas, se observa que el evento favorable puede producirse con una frecuencia próxima a su probabilidad (*ley empírica del azar*); así que, un suceso cuya probabilidad no difiere de 1 sino en una cantidad extremadamente pequeña ( $\pm 10^{-100}$ ), puede considerarse, efectivamente, como humanamente cierto. Sin embargo, aquí no hay que perder de vista que las cuestiones estadísticas siempre son problemas de las probabilidades de las causas. En forma más clara, Borel arguye "...Es necesario decir algunas palabras acerca de la forma en que se plantean, con frecuencia, los problemas prácticos, siendo de la forma: "tal resultado, ¿se debió al azar o tuvo alguna causa? A esta pregunta, la teoría de probabilidades proporciona a menudo una respuesta que no habría que considerar como decisiva, pero que sería excesivo negarle todo valor". Borel, E. (1996); *Probabilidad y Errores*; Colección *Metronómica*, Serie *Metrología Técnica*, Limusa Noriega Ed.; México. p 98.

de experiencias similares mediante expresiones relacionales que se orientan a dar una 'explicación' basada en la lógica, lo cual nos conduce a interpretar los resultados introduciendo la idea de que tal comportamiento se dio así porque había algo que lo orilló a comportarse de esa forma y no de otra, y que lo mismo ocurrirá con todos y cada uno de los eventos que se sometan a observación. En esto consisten las leyes naturales, es decir, son simplificadoras metodológicas, y al ser susceptibles de verificación experimental, se emplean como justificantes de la relación causal, brindándonos la posibilidad de seguir, en términos funcionales, el comportamiento del sistema en todo tiempo, y proporcionándonos la enorme ventaja de pronosticar y comprender la evolución del sistema al volverlo visualizable e, incluso, lógicamente justificable. Claramente, en el caso presente estamos refiriéndonos a las leyes naturales como enunciados observacionales cimentados en la relación causal como motor de ocurrencia y como regla universal. Bird clarifica esto cuando dice que

Laws need to be distinguished from statements of laws and from our theories about what laws there are. Laws are things in the world which we try to discover. In this sense they are facts or are like them. A statement of a law is a linguistic item and so need not exist, even though the corresponding law exists (for instance if there were no people to utter or write statements). Similarly, theories are human creations but laws of nature are not. The laws are there whatever we do—one of the tasks of the scientist is to speculate about them and investigate them. A scientist may come up with a theory that will be false or true depending on what the laws actually are. And, of course, there may be laws about which we know nothing.<sup>6</sup>

Y es que legislar el comportamiento de los sistemas naturales es el primer paso que se debe dar para comprender, y posteriormente explicar, la ocurrencia de los sucesos, pues sólo nos abocamos a analizar las regularidades por ser ellas las que se pueden modelar. Los eventos azarosos, en tanto que únicos e irrepetibles no pueden modelarse, quedando sólo como un caso anecdótico o curioso al ser un evento aislado. Max Planck, por su parte, señala:

<sup>6</sup> Bird, A. (1998): *Philosophy of Science; Fundamentals of Philosophy*. Series Editor: John Shand. University of Edinburgh. Routledge. Taylor & Francis Group. pdf. p. 17.

¿Cómo descubrimos las leyes de la Física y cuál es su naturaleza? Debe ser remarcado, para empezar, que no tenemos ningún derecho de asumir que alguna ley física existe, o que si ha existido hasta ahora, existirá para siempre en el futuro. Es perfectamente concebible que un buen día la Naturaleza producirá un evento que nos sorprenderá a todos; y si esto llegara a pasar estaríamos a merced de tal evento, aun si el resultado fuera tal que, a pesar de nuestros empeños, falláramos en introducir orden en la confusión restante. En tal evento, la única ruta abierta a la ciencia sería declararse en bancarota. Por esta razón, la ciencia es impelida a empezar por la suposición muy general de que una regla general domina a través de toda la naturaleza.<sup>7</sup>

Es fácilmente entendible entonces por qué el determinismo, y quizá aún más la relación causal, germinó en el pensamiento científico como el mecanismo explicativo por excelencia, a tal grado que ha sido, en términos generales, parte fundamental de la física clásica. De hecho, fue la física quien impulsó el uso generalizado de la relación causal como un elemento necesario para explicar los sucesos del mundo natural. La visión del mundo como un dispositivo mecánico se impuso gracias a las simplificaciones conceptuales y matemáticas que Newton introdujo en la física para explicar el comportamiento de los objetos; estas suposiciones simplificadoras que aparecieron en la axiomatización de las leyes físicas le confirieron a los fenómenos una simplicidad asombrosa que sólo requería de un conector entre la causa y el efecto; dicho conector fue la fuerza. Otra ventaja que se encontró al introducir la fuerza como elemento explicativo fue que el uso de este concepto era el mismo para todos los observadores, pues debían llegar a resultados equivalentes al estar sometidos al requerimiento de un tiempo y un espacio considerados absolutos. Esto posibilitó que los eventos se matematizaran, y con esta representación simbólica, se pudo predecir y retrodecir el estado del sistema en cualquier instante, necesitando conocerse únicamente las condiciones iniciales, pudiendo ser éstas fijas o aleatorias. Esta visión de la ciencia satisfacía el ideal platónico de representar la realidad matemáticamente, y concordaba con las aspiraciones de Galileo, de Descartes y de Kepler. Así, el determinismo parecía imponerse

<sup>7</sup> Félix Valdez, J. (2001): *La mecánica cuántica*. 1ª Ed.; Colección Nuevo Siglo. Serie Ciencia y Tecnología. Universidad de Guanajuato. SEP. 2001. p. 99.

sobre una naturaleza caótica, imponiendo un orden en todos y cada uno de los elementos del mundo.

#### EL DETERMINISMO LAPLACIANO

El personaje más connotado del determinismo científico es Laplace, que empleó la mecánica newtoniana para explicar el comportamiento de los cuerpos celestes. Laplace fincó la relación causal en la idea de fuerza, considerando que tal concepto puede interpretarse como el equivalente al eslabón de una sucesión de eventos que aparecen en orden secuencial, donde la causa y el efecto asumirían el papel de piñones en contacto y donde (aparentemente) se cuenta con una dirección preferencial de avance. El concepto *fuerza*, propuesto por Newton en el siglo XVII, fue el principal baluarte de la física hasta los albores del siglo XX, que fue cuando apareció la mecánica cuántica. Al apoyarse en este concepto físico-matemático, Laplace apologiza tenazmente la relación causal dentro de la naturaleza, pues para él

Todos los sucesos, hasta aquellos que a causa de su insignificancia no parecen seguir las grandes leyes de la naturaleza, son el resultado de ellas tan exacta y necesariamente como las revoluciones del sol [...] Supongamos por un instante el caso de una inteligencia que pudiera abarcar todas las fuerzas en virtud de las cuales la naturaleza está animada y la situación respectiva de los seres que la componen —una inteligencia suficientemente vasta para someter a análisis estos datos—, ella debería comprender en la misma fórmula los movimientos de los mayores cuerpos del universo y los movimientos del más ligero átomo; para ella, nada sería incierto y el futuro y el pasado serían el presente a sus ojos.<sup>8</sup>

Laplace expuso que si se conoce el estado actual de un sistema, es dable predecir con una precisión elevada cualesquier otro estado futuro de ese sistema. Esto lo llevó a decir que a todo efecto le antecede una causa, relación conocida como *relación de causa-efecto*. Es altamente significativa la formulación que aparece en su *Essai Philosophique sur les Probabilités*, de 1819:

<sup>8</sup> Hacking, I. (1995); *La domesticación del azar (La erosión del determinismo y el nacimiento de las ciencias del caos)*; Ed. Gedisa. España. p. 32.

Debiéramos...considerar el presente estado del universo como el efecto de su estado anterior y la causa del que seguirá. Supongamos...una inteligencia que pudiera conocer todas las fuerzas que animan a la naturaleza, y los estados, en un instante, de todos los objetos que la componen... para [esta inteligencia] nada podría ser incierto; y el futuro, como el pasado, sería presente a sus ojos.<sup>9</sup>

En este párrafo hasta cierto punto eufórico, Laplace<sup>10</sup> extrapola el determinismo y lo hace yacer en las entrañas de la naturaleza. Al igual que Newton, Laplace exalta una deidad, pues bajo su concepción determinista, parece ser evidente que tal "inteligencia" o potestad superior es quien rige la naturaleza y es capaz de fusionar el pasado y el futuro en un instante pudiendo, por tanto, predecir el ulterior comportamiento del sistema, es decir, implícitamente enuncia que en todo fenómeno natural la causa debe ser origen y/o motivo del consecuente efecto. Esto será viable siempre y cuando los sistemas físicos sean inmutables en el tiempo, haciendo con ello posible conocer con absoluta certeza el comportamiento futuro de un evento a partir del conocimiento de cualquier estado anterior y del conocimiento de las leyes naturales.

No es raro entonces que al observar fenómenos repetitivos, se buscara una explicación científica de lo ocurrido con silogismos convincentes y efectivos que tornaran la explicación en algo sencillo y claro. Las leyes naturales que la mecánica newtoniana exalta terminan por posicionar en un sitio de honor el determinismo a lo largo de doscientos años y simultáneamente sirven para desproveer del animismo el acaecer de los fenómenos en la naturaleza. Esta basificación de la relación causal en la teoría se asume como el principio más elemental del mundo a la vez que se erige también como el elemento que articula y estructura bien sea los conceptos teóricos o los procesos empíricos, además de introducir en la ciencia una metodología que es, hasta cierto punto, rígida pero efectiva. Con esto se alcanza a cumplir una

<sup>9</sup> Tomado de: Popper, K. R. (1996): *El universo abierto. Un argumento a favor del indeterminismo. Post Scriptum a la Lógica de la Investigación Científica*. Vol. II.; Tecnos. España. p. 22.

<sup>10</sup> No se debe perder de vista que Laplace es uno de los pioneros de la Probabilidad y la Estadística.

de las aspiraciones de los filósofos griegos pues, como Martínez expone,

Otros filósofos importantes en el desarrollo de esta tradición teórica son Pitágoras, Anaxágoras y Demócrito. De una manera diferente, cada uno de ellos elaboró la idea central de las tradiciones teóricas: el rechazo a factores explicativos sobrenaturales y la búsqueda de principios explicativos naturales de carácter general que permitieran dar cuenta de la experiencia de una manera inteligible. Estos filósofos no estaban interesados en la sistematización de datos de la experiencia como un fin importante de por sí, sino más bien en la función que esta sistematización ejercía en discusiones abstractas en las que contaban la economía y la consistencia de los argumentos, así como los principios en los que se basaban las teorías.<sup>11</sup>

Así, en el determinismo laplaciano se destacan como atributos esenciales no sólo la capacidad de predecir unívocamente el acontecer de los eventos en el universo, sino también la manera en que la predicción descansa totalmente en lo necesario de la ocurrencia. Esto debido a que el hombre, al desconocer cuál es la estructura real de la naturaleza se ve impelido, de acuerdo con su vocación inquisitiva y racional, a imponer una condición lógica (necesaria y suficiente) a la ocurrencia de los eventos, obligando a que la causa anteceda, *a fortiori*, a la aparición del efecto y a que éste acontezca sólo si se dio antes aquélla; esto, como se ha mencionado líneas arriba, sólo fue posible intuirlo gracias a la sencillez y fortalezas intuitiva y conceptual del concepto *fuerza*.

Para Laplace, el mundo esta constituido por corpúsculos interactuando entre sí de acuerdo a las leyes de la mecánica newtoniana. Así, si se quisiera conocer el estado<sup>12</sup> del sistema en cualquier instante  $t$ , tendrían que conocerse completamente sus condiciones iniciales; esto permitiría predecir el comportamiento del sistema en cualesquier tiempo posterior  $t_p$ , puesto que se satisface que:  $t < t_1 < \dots < t_n$ . Evidentemente, el número de variables involucradas puede ser incuantificable (por ser un sistema de

11 Martínez, Sergio F. (2001): *De los efectos a las causas. Sobre la historia de los patrones de explicación científica*; UNAM-Paidós. p. 30.

12 Por estado del sistema significamos el conocimiento de todas las variables necesarias para la descripción del sistema, por ejemplo: posición, masa, velocidad, dirección del movimiento, fuerza, presión, temperatura, etc.

partículas) y la labor descriptiva de la evolución del sistema sería un trabajo sobrehumano. Laplace imaginó entonces a un demonio –como una inteligencia superior al hombre– capaz de averiguar el conjunto completo de las condiciones del sistema en cualquier instante. Así, con las condiciones iniciales y las leyes naturales, y apoyándose en las ecuaciones de la mecánica, el demonio podría deducir todos los estados futuros del sistema. Este experimento mental de Laplace exhibe que, de conocerse cabalmente las leyes de la naturaleza, entonces el futuro del sistema estaría implícito en cualquier instante de su pasado; esto es precisamente una manera de concebir al determinismo. Ahora bien, el demonio laplaciano, metafóricamente hablando, sería un científico que trabaja con un sistema, conoce sus condiciones iniciales y las teorías que gobiernan su comportamiento, más que una deidad. Popper concibe al demonio en los mismos términos:

El punto crucial del argumento de Laplace es éste: *Hace de la doctrina del determinismo una verdad de la ciencia y no de la religión*. El demonio de Laplace no es un Dios omnisciente, sino simplemente un supercientífico. No se le supone capaz de nada que no puedan hacer los científicos humanos, o al menos que no puedan hacer aproximadamente: simplemente se le supone capaz de realizar sus tareas con perfección sobrehumana.<sup>13</sup>

El mismo Popper señala que las teorías que “respondan plenamente al propósito de Laplace pueden ser denominadas «deterministas *prima facie*»”,<sup>14</sup> donde

una teoría es determinista *prima facie* si, y sólo si, nos permite deducir –a partir de una descripción matemáticamente exacta del estado inicial de un sistema físico cerrado que se describe en términos de la teoría, la descripción, con cualquiera que sea el grado finito de precisión estipulado, del estado del sistema en cualquier instante dado del futuro.<sup>15</sup>

Asimismo, la idea del determinismo puede vislumbrarse más

13 Popper, K. R. (1996): *El universo abierto. Un argumento a favor del indeterminismo. Post Scriptum a la Lógica de la Investigación Científica*. Vol. II.; Tecnos. España. p. 53.

14 *Ibid.* p. 54.

15 *Ibid.* p. 54.

fácilmente, de acuerdo a la sugerencia de Popper, con la ayuda de la película que muestra los estados sucesivos del mundo. Tomando esto en cuenta,

Podríamos decir que el determinismo "científico" es consecuencia del intento de sustituir la vaga idea de conocimiento anticipado del futuro por la idea más precisa de predictibilidad de acuerdo con los procedimientos científicos racionales de predicción. Es decir, el determinismo afirma que el futuro puede deducirse racionalmente a partir de las condiciones iniciales pasadas o presentes en unión de teorías universales verdaderas.<sup>16</sup>

Así, este filósofo propone que el determinismo científico se puede definir como

la doctrina que dice que el estado de cualquier sistema físico cerrado en cualquier instante futuro dado puede ser predicho, incluso desde dentro del sistema, con cualquiera que sea el grado estipulado de precisión, mediante la deducción de la predicción a partir de teorías, en conjunción con condiciones iniciales cuyo grado de precisión requerido puede calcularse siempre (de acuerdo con el *principio de poder dar razón*) si la tarea de predicción es dada.<sup>17</sup>

#### EL INDETERMINISMO

El determinismo se relaciona estrechamente con una concepción mecanicista del universo, al considerar que la naturaleza posee un comportamiento similar al de una máquina. Históricamente, se puede considerar que el determinismo científico surge como una respuesta de los físicos para eliminar la idea de las leyes divinas a la hora de explicar cómo ocurren los eventos naturales, lo que les condujo a proponer las leyes naturales. Pero en el caso de un suceso natural, pareciera que todo sigue un guión definido de antemano, por lo que es fácil pensar que la naturaleza está sujeta a determinadas leyes naturales que gobiernan el devenir de los acontecimientos de la naturaleza, y que pueden ser descubiertas por medio de la experiencia y del razonamiento humano. Para el determinismo, si conocemos las leyes de la naturaleza, podemos predecir el futuro

16 Ibid. p. 55.

17 Ibid. p. 59.

a partir de los datos presentes por métodos puramente racionales, dado que todo suceso en el universo está predeterminado.

¿Pero qué ocurre si hubiese un suceso que no esté predeterminado? ¿Habría que rechazar el determinismo por eso?, es decir, ¿el determinismo deja de ser válido? Es de pensar que si hubiese un sólo suceso futuro en el universo que no pudiera predecirse, o si se encontrara un sitio donde las leyes naturales dejaran de valer, habría que rechazarlo en principio, y buscar por qué no se cumplen las leyes naturales.

Hume, al indagar sobre la Teoría de las ideas, cae en este tipo de problemas, llegando a cuestionar la relación causa-efecto. Al reflexionar sobre las creencias que la gente tiene acerca de los hechos y de su percepción temporal, centra su atención en la actuación y la deliberación, y en los probables cursos de acción posibles: puesto que las acciones aún no han ocurrido, sus consecuencias tampoco se han presentado, por lo que cualquier creencia que sobre ellas se tenga será incierta y deberá referirse, necesariamente, a algo “ausente”. Propone entonces:

Si se preguntara a un hombre por qué cree en un algún hecho que no presencia –por ejemplo, que su amigo está en el campo o en Francia–, daría una razón; y esta razón sería algún otro hecho, tal como una carta que recibiera de él, o el conocimiento de sus propósitos y promesas anteriores [...] Todos nuestros razonamientos relativos a hechos son de la misma naturaleza. Y en ellos se supone constantemente que hay una conexión entre el hecho presente y aquel que se infiere de él. Si no hubiera nada que los uniera, la inferencia sería totalmente incierta.<sup>18</sup>

Debido a esto, creemos que hay un vínculo entre el hecho que observamos y la situación de lo no observado al presente, infiriendo así una cosa de la otra. Inicialmente, Hume cree que esto se debe a “inferencias causales” o razonamientos fundados en una relación causal. Para comprender mejor esa relación, propone:

Es imposible razonar de un modo correcto, sin comprender perfectamente la idea sobre la cual

<sup>18</sup> Stroud, B. (1995); *Hume*; Colección Filosofía Contemporánea; Instituto de Investigaciones Filosóficas, UNAM; México. p. 66.

razonamos; y es imposible comprender perfectamente alguna idea, sin seguirla hasta su origen y examinar la impresión primaria de la cual surge.<sup>19</sup>

Al buscar más detenidamente el origen de la idea de causalidad, se da a la tarea de indagar qué son la causa y el efecto:

En primer lugar, encuentro que cualesquiera objetos considerados como causa o efectos son contiguos, y que nada puede actuar en un tiempo o en un espacio separado, por poco que sea, de los que corresponden a su existencia. Aunque a veces parezca que objetos distantes pueden producirse unos a otros, al examinarlos se halla, por lo común, que están conectados por una cadena de causas, las cuales son contiguas entre sí y respecto de los objetos distantes; y si en algún caso particular no podemos descubrir esta conexión, suponemos empero que existe.<sup>20</sup>

Es claro que Hume supone, en primera instancia, que hay una causalidad presente en el acontecer natural, y que todas las inferencias que nos llevan de lo observado a lo no observado tienen como sustento una relación causal, es decir, que si ocurre un evento C (de causa), entonces ocurrirá un evento E (de efecto); o dicho en la manera habitual: todo evento debe tener una causa. Sin embargo, al profundizar en sus reflexiones, se percató de que no necesariamente se cumple que si E ha acontecido es porque C ha ocurrido. Es este razonamiento el que pone en tela de juicio la validez del principio de causalidad, al no encontrar alguna justificación para su generalización, asegurando

de que todos nuestros razonamientos relativos a causas y efectos no se derivan más que de la costumbre; y de que la creencia es más propiamente un acto de la parte sensitiva de nuestra naturaleza, que un acto de la parte cogitativa. Acaso al final saldrá a la luz que la inferencia no depende de la conexión, sino que la conexión necesaria depende de la inferencia.<sup>21</sup>

Esta conclusión lógica es tajante y demoledora, siendo –para Hume– únicamente la observación reiterada de los fenómenos naturales, y su desenvolvimiento por etapas (o conjunción, como la denomina) lo que nos lleva a inferir la idea de la causalidad o de conexión necesaria.

19 Ibid. p. 66.

20 Ibid. p. 67.

21 Hume, *cit.* en Stroud, B., pp. 114 - 115.

EL INDETERMINISMO CIENTÍFICO

La reacción a las posturas deterministas es lo que suele conocerse con el nombre de indeterminismo. Esta doctrina niega que todo lo que sucede en la naturaleza tenga una causa, además de que pueden tenerse acontecimientos sin que esté involucrada la necesidad de la ocurrencia.

Ya se tenía como antecedente del indeterminismo la conclusión de Hume y su impecable desarrollo lógico, que resultó ser una losa muy pesada y difícil de mover para los defensores del determinismo. De hecho, tal conclusión es una de las razones que Popper esgrime siempre para atacar al determinismo científico:

Hume estaba interesado por la condición del conocimiento humano o, como él diría, por el problema de si nuestras creencias (o, al menos, algunas de ellas, se pueden justificar con razones suficientes. Planteó dos preguntas, una lógica ( $H_l$ ) y otra psicológica ( $H_p$ ), con la característica importante de que sus respuestas chocan entre sí de algún modo. La pregunta lógica es la siguiente:  $H_l$ : ¿Cómo se justifica que, partiendo de casos (reiterados) de los que tenemos experiencia, lleguemos mediante el razonamiento a otros casos (conclusiones) de los que no tenemos experiencia? [...] La pregunta psicológica es la siguiente:  $H_p$ : ¿Por qué, a pesar de todo, las personas razonables esperan y creen que los casos de los que no tienen experiencia van a ser semejantes a aquellos de los que tienen experiencia? Es decir, ¿Por qué confiamos tanto en las experiencias que tenemos?<sup>22</sup>

Las respuestas que Hume da a las preguntas anteriores ya las conocemos: no existe ninguna justificación, salvo la costumbre. Pero Popper continúa exponiendo argumentos que apuntan directamente al centro de flotación del determinismo científico, al esgrimir que nuestras teorías no son más que “redes creadas por nosotros para atrapar el mundo... Las teorías no son sólo instrumentos. A lo que aspiramos es a la verdad”.<sup>23</sup> Por ello, Popper propone un argumento lógico a favor del indeterminismo: la imposibilidad de la autopredicción. En él, arguye el filósofo, si poseyéramos un

22 Popper, K. R. (1982): *Conocimiento Objetivo. Un enfoque evolucionista*; Ed. Tecnos. Madrid. pp. 17-18.

23 *Ibíd.*, Popper. *El Universo abierto*. p. 65.

conocimiento teórico perfecto, y bien definidas las condiciones iniciales, se podría predecir, deductivamente, los estados futuros de cada persona. Pero esto es absurdo, puesto que nos llevaría a una teoría con contradicciones internas.<sup>24</sup>

Pero igualmente, cuando se estudia el determinismo laplaciano y se intenta justificar, se encuentran algunas dificultades, pues la naturaleza no exhibe un comportamiento lo bastante uniforme como nos gustaría, o bien, desconocemos nuevamente todos los factores que nos permitirían realizar una predicción, es decir, no tenemos a la mano un demonio de Laplace. Hacking lo expone con toda claridad: es más viable manejar certezas estadísticas que certezas absolutas, y con ello, el determinismo falla. Así lo expone

¿Cómo debía entender uno la estabilidad estadística en un universo laplaciano, en un universo en el que un espíritu convenientemente informado sería capaz de calcular todos y cada uno de los futuros sucesos partiendo de una exposición completa del estado de cosas en el universo y en un determinado momento? Laplace había dicho que la probabilidad es en parte el resultado de nuestro conocimiento y en parte el resultado de nuestra ignorancia.<sup>25</sup>

Por su parte, y como colofón, la mecánica cuántica, al estudiar el comportamiento de los eventos subatómicos, se encuentra imposibilitada para llevar a cabo una predicción satisfactoria empleando la mecánica newtoniana. Para llevar a cabo su cometido, introduce entonces dos ideas esenciales para percibir los eventos del microcosmos: la primer idea conlleva el derrumbamiento de la certeza –tan característica de la física clásica–,<sup>26</sup> al encontrar que

24 Ibid. Popper. *El Universo abierto*. pp. 64-100.

25 Ibid., Hacking. *La domesticación del azar*, p. 165.

26 Recordemos que un fenómeno aleatorio (fortuito o al azar) es un fenómeno empírico que se caracteriza por la propiedad de que, al observarlo bajo determinado conjunto de condiciones, no siempre se obtiene el mismo resultado, es decir, no existe regularidad determinista, sino que los diferentes resultados ocurren con regularidad estadística; esto lleva a decir que existen números entre los valores 0 y 1 que representan la frecuencia relativa con la que se observan los diferentes resultados en una serie de repeticiones independientes del fenómeno. Decimos entonces que la probabilidad de que ocurra el evento A, denotada por  $P(A)$ , con A elemento de un espacio muestral  $\Omega$ , es un valor que se encuentra entre los valores 0 y 1. En términos probabilísticos, la certeza –o evento seguro– está dado por  $P(\Omega) = 1$ , mientras que el evento imposible está dado por  $P(A) = 0$ . Más aún, si se tiene una serie muy grande de pruebas, se observa que el evento favorable puede producirse con una frecuencia próxima a su probabilidad (*ley empírica*

la posición de una criatura atómica no puede determinarse con precisión en sitios o en tiempos definidos, siendo necesario introducir conceptos estadístico-probabilísticos para hacerlo, propiciando con ello que el manejo de la probabilidad sea un elemento fundamental para la comprensión y explicación del acontecer atómico y exaltando nuevamente la indeterminación. Veladamente, esto lleva a afirmar que en la naturaleza no existen leyes naturales, sino leyes estadísticas.<sup>27</sup>

La segunda idea no dejó de causar sorpresa al proponer que un observador, al estudiar un suceso atómico, ocasiona una perturbación en el desarrollo del fenómeno bajo estudio, llevándonos a una relación –tal vez directa–: fenómeno cuántico–observador, lo que inevitablemente nos regresa al subjetivismo.

El indeterminismo pues, retoma un nuevo impulso, al ser catapultado y establecido sin ambages por la postulación de los Principios de Complementariedad de Bohr y de Indeterminación o Principio de Incertidumbre de Heisenberg, que pueden enunciarse como:

Al querer asignar atributos físicos habituales a los objetos atómicos, como resulta evidente en el dilema planteado respecto a las propiedades corpusculares y ondulatorias de los electrones y fotones, nos enfrentamos con imágenes contrapuestas, cada una de las cuales se refiere a un aspecto esencial de la información empírica (de ellos obtenida).<sup>28</sup> (Principio de Complementa-

*del azar*); así que, un suceso cuya probabilidad no difiere de 1 sino en una cantidad extremadamente pequeña ( $\approx 10^{-100}$ ), puede considerarse, efectivamente, como humanamente cierto.

27 Aquí no hay que perder de vista que las cuestiones estadísticas siempre son problemas de las probabilidades de las causas. En forma más clara, Borel arguye "...Es necesario decir algunas palabras acerca de la forma en que se plantean, con frecuencia, los problemas prácticos, siendo de la forma: "tal resultado, ¿se debió al azar o tuvo alguna causa? A esta pregunta, la teoría de probabilidades proporciona a menudo una respuesta que no habría que considerar como decisiva, pero que sería excesivo negarle todo valor". (Borel, E. (1996); *Probabilidad y Errores*; Colección Metronómica, Serie Metrología Técnica, Limusa Noriega Ed.; México, p.98.

28 Bohr, N. (1964); *Física atómica y conocimiento humano*; Aguilar, S. A. de Ediciones; España; p. 49-50. Esto puede decir, de manera más simple, que los objetos no son ondas ni partículas, sino que asumen el papel de uno u otro objeto dependiendo de la observación que se lleve a cabo. Formalmente se enuncia: "Los objetos en la naturaleza no son partículas ni son ondas; un experimento o medición que resalte una de estas propiedades, lo hace necesariamente a expensas de la otra. ... La descripción cuántica de las propiedades de un sistema físico se expresa en términos de parejas de variables mutuamente complementarias. La precisión en la determinación de una de estas variables, necesariamente implica una imprecisión en la determinación de la otra."

riedad). No es posible determinar la fijación de dos variables conjugadas  $q$  y  $p$  de una partícula con precisión ilimitada, es decir, Principio de Incertidumbre.<sup>29</sup>

La mecánica cuántica causó un hondo impacto en el pensamiento científico al proponer una insólita visión de la naturaleza después de subir al escenario científico el indeterminismo y la discontinuidad de los procesos naturales. Puso en evidencia la realidad que cotidianamente percibimos como continua, arguyendo que la continuidad solamente aparece en los niveles ordinarios de observación, ya que a niveles atómicos la naturaleza se muestra totalmente discreta, desapareciendo así la posibilidad de describir con toda precisión el comportamiento de los sistemas microscópicos. Esta propuesta causó una gran conmoción en la comunidad científica e impulsó una revolución conceptual que puso en entredicho la eficacia explicativa de las leyes de Newton.

De entre los presupuestos fundamentales para el desarrollo teórico cuántico destaca el Principio de Heisenberg, por ser el que abre la puerta al indeterminismo como elemento constituyente esencial de la nueva física. Tal principio consiste en enunciar que la naturaleza es azarosa en sí misma al esgrimir que el azar es una característica propia del mundo externo, negando con ello la existencia de un orden natural que se manifiesta en forma de leyes naturales.

Sin embargo, si bien esto puede ser admisible a nivel cuántico, en lo que respecta al nivel macroscópico no es del todo claro, puesto que la postura determinista ha soportado con firmeza los embates de la postura indeterminista, y lo ha conseguido gracias a su eficacia predictiva y su poder explicativo que dan cuenta del por qué de la ocurrencia natural, a tal grado que aún hoy sigue siendo la figura

(Saxon, D. S. (1968); Elementary Quantum Mechanics; Holden-Day, USA; pp 16-17).

29 Las variables conjugadas de una partícula pueden ser, por ejemplo, la cantidad de movimiento  $\Delta p$  y la posición  $\Delta x$ , o la energía  $\Delta E$ , y el tiempo  $\Delta t$ . En todo caso, se cumple que  $\Delta q \Delta p \geq h/2\pi$ , siempre;  $h$  se denomina *constante universal de Planck* o "*cuanto de acción*", donde  $h = 6.625 \times 10^{-34}$  J.s

emblemática del explicacionismo científico. Y es que la visión de algunos científicos que consideraron a la naturaleza como un gigantesco mecanismo donde era necesaria cierta secuencialidad en los eventos (la causa antecediendo al efecto) ha permeando variopintas teorías que han aparecido a lo largo de tres siglos, haciendo que de una u otra manera se sujetaran a la legislación newtoniana. Esta legislación introdujo el concepto de fuerza como el 'eslabonador' (incluso lógico) de los sucesos; sin duda esto fue lo que permitió que la fuerza se erigiera como la panacea explicativa del mundo natural. Aún perdura esta idea, y el autor encuentra que este concepto -o sus modalidades, como la teoría de los campos- reúne los requisitos para continuar explicando el por qué de las cosas, y que cuando no logramos hacerlo así, caemos en problemas que parecen ser irresolubles. El estudio de los objetos atómicos, hasta este momento, es uno de esos problemas, y quizá por ello, la mecánica cuántica parece inclinarse por el indeterminismo.

Sin embargo, el problema central debe ser, más que el determinismo, la amplitud y validez de la relación causal, pues a fin de cuentas es ella la que aparece en las tesis deterministas e indeterministas. Y digo esto porque me parece que la tesis indeterminista no se puede sostener por sí misma aludiendo a la repetitividad de los eventos y apoyándose solamente en las regularidades estadísticas, pues a fin de cuentas, el hecho de que haya una regularidad estadística implica, de necesidad, una región de estabilidad que el sistema debe alcanzar en determinados momentos, y esto es una explicación determinista.

Una cosa es clara: ni la ciencia ni la filosofía han demostrado de manera completa, objetiva y fría, si el determinismo -o más bien, la relación causal- vale o no en la naturaleza, pues ambas posturas tienen argumentos de mucha valía a favor y en contra. El determinismo ha sido fieramente apologizado y duramente vilipendiado, y en el mismo talante se encuentra el indeterminismo; pero considero que son creencias personales las que hacen que una persona se incline hacia un lado u otro. Por mi parte, me inclino más por el determinismo, sobre todo porque creo que existen leyes

naturales, así sea en los arcanos más profundos y oscuros del átomo, que son los que posibilitan el equilibrio y la estabilidad de los sistemas.

#### CONCLUSIONES

Como se ha visto a lo largo del presente trabajo, desde que el ser humano comenzó a observar con mayor detenimiento su entorno, ha buscado dar una explicación del acontecer de las cosas. Para ello, ha recurrido a los dioses o a principios básicos que expliquen el por qué de los sucesos. Más aún, el desarrollo de la filosofía, y posteriormente de la física, posibilitó tener la impresión de que el funcionamiento de la naturaleza es equivalente al de un mecanismo, obligándola a admitir una relación de causa-efecto. Esta idea ensalzó algunos modelos exitosos debido a su elevada precisión en la predicción de los acontecimientos. Tal tipo de explicación ha recibido el mote de determinista.

Sin embargo, al encontrar un fenómeno que sale de la potestad de la teoría explicativa, ha hecho dudar a varios pensadores y científicos si el determinismo vale o no, lo que ha llevado el pensamiento hacia el otro extremo, es decir, hacia el indeterminismo.

Una gran controversia entre los apologistas de una u otra doctrina se ha levantado. Por la filosofía descuellan, sin duda alguna, los indeterministas Hume y Popper, quienes con su capacidad intelectual y agudo ingenio han cuestionado fuertemente las tesis deterministas.

Pero no sólo están los cuestionamientos filosóficos, pues en la ciencia también se han suscitado tales polémicas, teniéndose de un lado dos grandes contendientes que parecen dar la razón al determinismo científico: la mecánica clásica y la teoría de la relatividad. Del otro lado, está la mecánica cuántica, un rival de gran fortaleza conceptual que parece inclinarse por el indeterminismo.

Los argumentos de ambos bandos son sólidos, y hay que analizarlos concienzudamente para llegar a determinar con mayor

claridad si el determinismo en la mecánica cuántica, sobre todo en lo relativo al principio de incertidumbre, es válido o no. Para ello, hay que desenmarañar la madeja de argumentos deterministas e indeterministas relacionados con él, porque ambos rivales cuentan con grandes logros que presumir y argumentos de mucho peso, a favor o en contra. La moneda pues, está en el aire.

BIBLIOGRAFÍA

- Beuchot, M. (1987); *Conocimiento, Causalidad y Metafísica*; Universidad Veracruzana, Xalapa; México.
- Bird, A. (1998).pdf: *Philosophy of Science; Fundamentals of Philosophy*. Series Editor: John Shand. University of Edinburgh. Routledge. Taylor & Francis Group.
- Borel, E. (1996); *Probabilidad y Errores*; Colección Metronómica, Serie Metrología Técnica, Limusa Noriega Ed.
- Earman, J. (1986).pdf: *A primer on determinism*; D. Reidel Publishing Company; Netherlands.
- Enciclopedia Hispánica*. Vol. 5; Encyclopaedia Britannica Publishers, Inc. USA. 1995-1996.
- Ferrater Mora, J. (1964).pdf: *Diccionario de filosofía. Tomo I: A-K*; Ed. Sudamericana. Buenos Aires.
- Gamow, G. (1971): *Biografía de la física*; Biblioteca General Salvat; Salvat Editores; España, 1971.
- Hacking, I (1995); *La domesticación del azar (La erosión del determinismo y el nacimiento de las ciencias del caos)*; Ed. Gedisa. España.
- Lagemann, R. T. (1963): *Ciencia Física. Orígenes y Principios*; Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana. México, 1968.
- Mach, R. (1977); *Física para poetas*; Siglo XXI Editores. México
- Marías, J. (1941): *Historia de la filosofía*. 30ª Ed.; Biblioteca de la Revista de Occidente. Madrid. 1978.
- Martínez, Sergio F. (2001): *De los efectos a las causas. Sobre la historia de los patrones de explicación científica*; UNAM-Paidós.
- More, L. T. (1934): *Isaac Newton, A Biography*; Dover. USA.
- Newton, I. (1686): *Escolio de los Philosophiae naturalis principa*

*mathematica*; en: Einstein, A., Grünbaum, A., Eddington, A. S. y otros (1978): *La teoría de la relatividad. Sus orígenes e impacto sobre el pensamiento moderno*; Selección de Williams, L. Pearce; Alianza Editorial. Madrid. 1978.

\_\_\_\_\_ (1729).pdf: *Mathematical principles of natural philosophy and his system of the world. Vols. II & III: The system of the world*. University of California Press. USA.

\_\_\_\_\_ (1987): *Principios matemáticos de la filosofía natural, 2. Libro II y Libro III*; Alianza Editorial, S. A.; Madrid.

Platón; *Diálogos de Platón. Teetetes o de la ciencia*; 15<sup>a</sup>. Edición; Editorial Porrúa, S. A.; México, 1975.

Popper, K. R. (1982): *Conocimiento Objetivo. Un enfoque evolucionista*; Ed. Tecnos. Madrid

\_\_\_\_\_ (1996): *El universo abierto. Un argumento a favor del indeterminismo. Post Scriptum a la Lógica de la Investigación Científica. Vol. II.*; Ed. Tecnos. Madrid.

\_\_\_\_\_ (1992): *Un mundo de propensiones*; Ed. Tecnos. Madrid.

Psillos, S. (2007).pdf: *Philosophy of science A-Z*; Edinburgh University Press; G. B.

Saxon, D. S. (1968); *Elementary Quantum Mechanics*; Holden-Day, USA.

Stroud, B. (1995); *Hume*; Colección Filosofía Contemporánea; Instituto de Investigaciones Filosóficas, UNAM; México.

Symon, K. R. (1977): *Mecánica*; Colección Ciencia y Técnica. Ed. Aguilar; España.

#### Referencias

*Enciclopedia Encarta*; Microsoft 2000.

*Enciclopedia Católica. Libre voluntad*. <http://ec.aciprensa.com/librevoluntad.htm>

<http://es.wikipedia.org/wiki/Estoicismo>

[http://www.La.construcción.científica.de.la.realidad\\_Determinismo e indeterminismo\\_El.postulado.de.la.objetividad.htm](http://www.La.construcción.científica.de.la.realidad_Determinismo.e.indeterminismo_El.postulado.de.la.objetividad.htm)

[http://it.wikipedia.org/wiki/Ecfanto\\_di\\_Siracusa](http://it.wikipedia.org/wiki/Ecfanto_di_Siracusa)

[http://es.wikipedia.org/wiki/Galileo\\_Galilei](http://es.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei)

[http://es.wikipedia.org/wiki/Causa \(desambiguaci%C3%B3n\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Causa_(desambiguaci%C3%B3n))  
<http://www.biografiasyvidas.com/biografia/l/leucipo.htm>  
<http://www.monografias.com/trabajos16/nicolas-copernico/nicolas-copernico.shtml#COSMOL>  
<http://www.dpye.iimas.unam.mx/PresentacionesJornadas2007/IgnacioMendez.pdf>.



En la investigación, se estudió el efecto de la interacción social en la conducta disruptiva de los niños con síndrome de déficit de atención con hiperactividad (TDAH) en un aula de educación primaria. Para ello, se diseñó un protocolo de intervención que consistió en proporcionar a los niños con TDAH un espacio de trabajo estructurado y con apoyo visual durante las actividades de aprendizaje. Los resultados mostraron que los niños con TDAH que recibieron la intervención mostraron una disminución significativa en la conducta disruptiva y un aumento en la funcionalidad. Los resultados también indicaron que los niños con TDAH que recibieron la intervención mostraron una mayor funcionalidad en las actividades de aprendizaje que los niños con TDAH que no recibieron la intervención.

Palabras Clave: interacción social, internos, pensamiento, comunicación, funcionalidad del comportamiento social, intercambio, conductas disruptivas.