



Universidad Nacional Autónoma de México
Programa de Maestría y Doctorado en Filosofía de la Ciencia

Facultad de Filosofía y Letras | Facultad de Ciencias
Instituto de Investigaciones Filosóficas | Dirección General de Divulgación de la Ciencia

*Alcances e implicaciones de la divulgación alrededor de los
debates fundamentales de la física cuántica*

T E S I S

Que para optar por el grado de:
Doctora en Filosofía de la Ciencia

Presenta:
Pamela Geraldine Olivo Montaña

Directora de tesis:
Dra. Ana María Cetto Kramis
Facultad de Ciencias, UNAM

Comité tutor:
Mtra. Ana María Sánchez Mora
Dirección General de Divulgación de la Ciencia, UNAM
Dr. Elías Okon Gurvich
Instituto de Investigaciones Filosóficas, UNAM

Ciudad Universitaria, Ciudad de México · Agosto, 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ALCANCES E IMPLICACIONES DE LA DIVULGACIÓN ALREDEDOR DE LOS
DEBATES FUNDAMENTALES DE LA FÍSICA CUÁNTICA

Pamela Geraldine Olivo Montaña

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada en el periodo 2013-2017, la cual permitió emprender el proyecto de investigación.

Agradezco a la Dra. Ana María Cetto, directora de tesis, por mostrar interés en el proyecto y aceptar guiarme en un momento en el que parecía no tener un camino establecido. Por su paciencia, motivación, las revisiones y la enseñanza brindada durante el proceso del presente trabajo. Por el tiempo compartido en cada una de las reuniones que siempre resultaron enriquecedoras.

A Ana María Sánchez quien siempre estuvo presente y me animó a continuar, por su apoyo en el sentido académico y personal, por creer en el proyecto, por su orientación, consejos y por cada una de sus lecturas siempre críticas.

A los miembros del comité: Dra. Fernanda Samaniego, Dr. Elías Okon y Fís. Sergio de Régules, quienes amablemente hicieron lectura del trabajo y brindaron comentarios valiosos y acertados, los cuales permitieron mejorar el trabajo.

A mis padres, Carmelina y José Ramón, por el apoyo total e incondicional que siempre me han brindado. A mis hermanos, Gerardo y Karla, quienes también siempre estuvieron acompañándome.

A mis amigos: Mónica, Semati, Jesús, Mary, Rocío, Andrei, Yanin y Pablo, quienes figuraron como un soporte anímico y que a pesar de la distancia ofrecieron aliento para continuar con este proyecto. Agradezco a Guillermo por su apoyo, por leer y compartir valiosos consejos, por su compañía.



CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	8
PREÁMBULO	
Acercamiento a las ideas básicas en comunicación de la ciencia.....	18
CAPÍTULO 1	
LA DIVULGACIÓN DE LA CIENCIA; EL CASO DE LA FÍSICA CUÁNTICA	28
1.1 Importancia y objetivos de la divulgación científica.....	30
1.2 Vigencia y perspectivas en la divulgación de la física cuántica.....	34
CAPÍTULO 2	
EXPOSICIÓN DE LA TEORÍA CUÁNTICA EN LAS PUBLICACIONES DIVULGATIVAS	45
2.1 Representación del comportamiento dual de la materia en la física cuántica a través de textos divulgativos	52
2.2 Representación de la característica de indeterminismo en la física cuántica a través de textos divulgativos.....	93
2.3 Representación del papel del observador y los instrumentos de medición a través de textos divulgativos	119
CAPÍTULO 3	
ALCANCES Y DIFICULTADES AL TRANSMITIR LA FUNDAMENTACIÓN CONCEPTUAL DE LA FÍSICA CUÁNTICA ..	165
3.1 Surgimiento de las primeras publicaciones divulgativas en las que se descontextualiza la física cuántica.....	171
3.2 Representación de las relaciones establecidas entre la física cuántica y el misticismo oriental	180
3.3 Transgresión de fronteras.....	186
3.4 ¿Divulgación pseudocientífica?	186
CAPÍTULO 4	
ESTRATEGIA PARA UNA REPRESENTACIÓN DIVULGATIVA DE LOS DEBATES FUNDAMENTALES DE LA FÍSICA CUÁNTICA	200
4.1 Reconstrucción de los modelos de divulgación utilizados en los textos divulgativos sobre física cuántica	202
4.2 Dificultades y desafíos para la representación divulgativa de la física cuántica.....	230
4.3 La narrativa como un recurso para la divulgación de la ciencia	239

4.4 Estrategia para divulgar los debates fundamentales de la física cuántica.....	247
CONCLUSIONES	280
APÉNDICES	
APÉNDICE A Listado de títulos de publicaciones divulgativas sobre física cuántica	281
APÉNDICE B Vínculo entre filosofía y física.....	289
APÉNDICE C Experimento de la doble rendija explicado por Richard Feynman	294
APÉNDICE D Cuadro comparativo entre interpretaciones realistas e interpretaciones instrumentalistas para la física cuántica.....	304
BIBLIOGRAFÍA.....	313
FIGURAS	
Fig. 1	61
Fig. 2	174
Fig. 3	223
Fig. 4	249

INTRODUCCIÓN

La física cuántica ha sido calificada como una de las ciencias más exitosas que se haya desarrollado, debido a la exactitud de sus predicciones y también por los avances tecnológicos que se han desprendido de ella. Entender los fenómenos cuánticos ha permitido el desarrollo de mucha de la tecnología con la que convivimos de manera habitual; por ejemplo, los transistores o los láseres, necesarios para el funcionamiento de los aparatos electrónicos como teléfonos celulares, computadoras, televisiones, etcétera.

No sólo se le ha valorado por ser el núcleo de mucha de la tecnología actual, sino que también esta ciencia evoca adjetivos de extrañeza y asombro, y en ese sentido resulta ser una teoría atractiva para quienes se dedican a la divulgación y para el público no experto interesado en el tema.

Con respecto a lo anterior, en la actualidad es frecuente encontrar el término “cuántica” o “cuántico” en distintos espacios. Imaginemos que visitamos alguna librería y nos dirigimos a los estantes de la sección de “divulgación”; en ese lugar es muy probable que encontremos una serie de libros que en sus títulos llevan la palabra “cuántica” o “cuántico”. Al estar catalogados como divulgativos –si nos consideramos una persona que

quiere acercarse al tema pero que no tiene conocimientos previos— sería factible pensar que esos títulos nos ayudarán a introducirnos y comprender esa ciencia, no obstante, varios de esos títulos resultarían ser “divulgación pseudocientífica”¹, como se han nombrado en la presente investigación. Cobra importancia mencionar este último aspecto debido a que hoy en día podemos encontrar referencias a los términos “cuántica” o “cuántico” tanto en publicaciones editoriales como en otros medios: en la televisión, radio, medios digitales, publicidad, etcétera. Solo basta hacer una búsqueda rápida en internet para observar la gran cantidad de entradas que se generan a partir de esos términos; entre ellas encontraremos información fiable pero también información procedente de charlatanería, en donde se llega a ofrecer terapias alternativas que ponen en riesgo la salud y economía de quienes confían en ello. Dicha situación resulta un tema de interés para la divulgación al estar vinculada con uno de los objetivos que en esta actividad se persiguen; evitar o eliminar los engaños que en ocasiones se hacen pasar como divulgación científica (Sánchez, 2010).

Regresemos a la presentación de la física cuántica. Decíamos que se trata de una ciencia que cuenta con una gran precisión en sus predicciones y que a partir de ella se han generado diversos avances tecnológicos; no obstante, a pesar de esas cualidades, en los fundamentos de la física cuántica han aparecido cuestiones que han provocado debates con sentido filosófico entre los físicos involucrados en el tema. Algunas de esas problemáticas aún siguen presentándose en la actualidad, pues entre los físicos no se ha llegado a un consenso. La relación entre los debates fundamentales de la teoría y su divulgación es la idea esencial que promovió el desarrollo de la presente tesis.

En la tesis apelamos a la importancia de mostrar al público las vicisitudes que se presentan en la ciencia en el sentido que se proporcionaría una imagen más integra del quehacer de esta actividad, y considerar que dichas dificultades consisten en retos en los que hay que trabajar para alcanzar un conocimiento más exacto, por decirlo de alguna manera. El mostrar solo los éxitos logrados por la ciencia podría transmitir una imagen desacertada de la ciencia en la que se estaría promoviendo una idea dogmática.

Las preguntas iniciales que motivaron el presente trabajo de investigación fueron: ¿los debates fundamentales implícitos en la teoría son expuestos en los trabajos de

¹ Este tipo de publicaciones resultan un asunto problemático de interés para la divulgación de la ciencia en general, para la física cuántica y también es un tema de interés para la filosofía, pues se relaciona al tema de la demarcación en ciencia, esto es, definir las fronteras entre lo que es conocimiento científico y aquel que no lo es, dicho a grandes rasgos. Sobre ello se hablará en el capítulo 3.

divulgación sobre el tema?, si es así, ¿cómo son representados en el discurso divulgativo?, ¿cuál es la relevancia y el alcance de divulgar los debates fundamentales de la física cuántica?, ¿cómo se podría impulsar la divulgación de esta ciencia y evitar caer en una “divulgación pseudocientífica”?, ¿qué estrategias de divulgación serían las adecuadas para alcanzar los ideales u objetivos que pretende la actividad de divulgar la ciencia en relación con los fundamentos de la física cuántica? Estos y otros cuestionamientos actuaron como hilo conductor para el desarrollo de la tesis, cuyo objetivo principal es **proponer una estrategia de divulgación para exponer las implicaciones ontológicas y epistemológicas de la física cuántica y los debates en torno a las mismas, lo cual permita promover un acercamiento racional y un entendimiento más claro e íntegro del tema en el público no especializado.**

Esta sección tiene como objetivo mostrar los fines que se buscaron alcanzar en la investigación, así como algunas de las ideas fundamentales que se desarrollan a lo largo de la tesis. Presentar los objetivos perseguidos en cada uno de los capítulos, considerados como objetivos específicos, nos permitirá distinguir cómo está dispuesta la estructura que se estableció para dar cuenta de dichos propósitos y cómo ellos permiten alcanzar el objetivo principal.

Debido al carácter preliminar de esta sección, lo expuesto se caracteriza por su brevedad y por mostrar ideas generales, las cuales serán desarrolladas a lo largo de los capítulos que conforman la tesis.

En el presente trabajo hacemos un recorrido a través de una selección de publicaciones de divulgación que han tenido como tema central la física cuántica; serán este tipo de textos los que han de representar el objeto de estudio de la presente tesis. En esas publicaciones **se realizará una evaluación crítica sobre su contenido, poniendo mayor atención en aquellos aspectos de la teoría cuántica que han incitado debates alrededor de sus fundamentos.** Como veremos, estos debates se han presentado entre grupos de físicos preocupados por los fundamentos de la teoría, pero también han alcanzado otros sectores, como es el caso de algunos filósofos de la ciencia e historiadores de la ciencia interesados en el tema. Muchas de esas discusiones están enfocadas en cómo comprender o interpretar el formalismo que la teoría cuántica ha planteado, o bien, en la comprensión de qué tipo de mundo nos está describiendo la teoría: se cuestionan por el sentido ontológico de la teoría. Ante esto, analizaremos cómo este tipo de preocupaciones se han reflejado en ciertos textos de divulgación relacionados con la teoría.

En un primer momento del presente trabajo de investigación examinamos el contexto actual en el que se encuentra la divulgación de la física cuántica en el formato de libro. Para ello retomamos algunos de los textos divulgativos de reciente aparición, publicados en la última década, con la intención de identificar la justificación y los objetivos que aportan los autores para divulgar dicha disciplina; ello nos ilustrará sobre la vigencia y perspectiva de esta actividad y además, nos dará indicios del tipo de contenido que se presenta a los lectores y si toman en consideración los debates fundamentales de la teoría. Esta exposición se desarrolla en el **capítulo 1**.

Existe una gran cantidad de publicaciones divulgativas relacionadas con la física cuántica, pues el espectro de publicaciones alrededor del tema es muy amplio, dado que ellas comenzaron a emerger casi a la par de la construcción de sus cimientos teóricos y en la actualidad siguen apareciendo textos que exponen esta ciencia a un público².

Para la elaboración de la investigación, y buscando un mejor análisis de las obras, sólo se seleccionó una muestra conformada por algunas de las publicaciones más representativas que aparecieron en los albores de esta teoría y otras más recientes, específicamente en la segunda mitad del siglo XX al surgir el *boom de la divulgación*³.

Las publicaciones divulgativas alrededor de la física cuántica que seleccionamos para su análisis son las siguientes⁴:

- *The Nature of the Physical World* (1928) de Sir Arthur Eddington
- *The Mysterious Universe* (1930) de Sir James H. Jeans
- *La Physique Nouvelle et les Quanta* (1937) de Louis De Broglie
- *The Evolution of Physics* (1938) de Albert Einstein y Leopold Infeld
- *Mr. Tompkins in Wonderland* (1940) de George Gamow
- *Biography of Physics* (1961) de George Gamow
- *The Character of Physical Law* (1965) de Richard Feynman, y
- *The Tao of Physics* (1975) de Fritjof Capra.

² Para observar una lista de publicaciones divulgativas sobre la física cuántica se puede consultar el APÉNDICE A.

³ Se ha llamado *boom de la divulgación* al periodo en el que se observó un aumento en la producción de proyectos de divulgación de la ciencia en diversos medios.

⁴ Las fechas de estas publicaciones corresponden a la primera edición.

La razón de tomar las publicaciones mencionadas, delimitadas por su fecha de publicación, se debe, precisamente, a uno de los propósitos de la investigación: **trazar una línea evolutiva de los textos de divulgación que nos permita observar y comparar cómo en ellos se fueron presentando los cuestionamientos hacia los fundamentos de la teoría cuántica**. Esto es, cómo los autores representan en un discurso divulgativo el carácter epistemológico y ontológico que se encuentra implícito en la teoría. Algo a considerar es que los autores de los textos elegidos son físicos de profesión y que en algún momento emprendieron la actividad de divulgación.

En este sentido, es importante destacar que en ese periodo la divulgación de la ciencia fue realizada por los propios científicos interesados en ello; posteriormente, en los inicios del siglo XX, los autores de la divulgación científica se diversificarían, pues además de los científicos, también participarían periodistas de ciencia y comunicadores de ciencia como figuras profesionalizadas en el área. (Massarani & Moreira, 2004)

A lo largo del **capítulo 2** hacemos un análisis a las publicaciones elegidas, en el que observamos que la forma en que la teoría cuántica ha sido tratada en el discurso de divulgación responde a diversos factores. Por ejemplo, al momento o fecha de publicación, a la formación y el estilo del autor. Con respecto al autor, considerándolo como un factor, hemos de tener en cuenta que el contenido que se le presenta al público podría estar sesgado por los intereses e intenciones de quien escribe. En este sentido, observaremos que la figura del autor jugará un papel importante para la justificación y respaldo del contenido.

Como ya se dijo, la mayor parte de los autores de este tipo de textos son los propios físicos, quienes exponen al lector argumentos derivados de su formación académica. Por lo anterior, como parte de la investigación en la tesis, nos detenemos a observar un poco los antecedentes de los autores. Esta simple anotación va más allá de la tarea de presentar cierto contenido a un público general, pues consideramos que la información expuesta en las publicaciones revela un vínculo con los principios heredados de la formación académica del autor. Estas particularidades se harán visibles al momento de distinguir la interpretación de la teoría que los autores acogen al desarrollar el discurso divulgativo.

Para realizar el análisis de los textos en función de los temas que han promovido discusiones en los fundamentos de la teoría se tomaron en cuenta tres ideas básicas: el comportamiento dual de los componentes mínimos de la materia, el indeterminismo y el

papel del observador. Se hablará un poco más de ellos en la siguiente sección de esta introducción.

Por otro lado, es relevante resaltar que en la divulgación de la física cuántica surgió una tendencia a presentar la teoría desde una interpretación misteriosa, mística o esotérica, lo que ha promovido ideas sobre el significado de la teoría que no se ajustan a las explicaciones y descripciones que nos da la teoría. Un ejemplo de este tipo de interpretación lo observaremos al analizar el texto *El tao de la física* (1975) de Fritjof Capra. A pesar de que ha recibido diversas críticas por considerársele una publicación que ha fomentado ideas pseudocientíficas alrededor de la física cuántica, pues este se ha tomado como una referencia para posteriores publicaciones similares, en el sector editorial se le ha clasificado como un texto divulgativo que en su momento tuvo un impacto significativo en los lectores y que tuvo un gran alcance por las diversas traducciones que logró y las grandes ventas obtenidas. Tomar en cuenta esta publicación cobra importancia ya que nos permitirá **indagar sobre algunas características de la teoría que se han desvirtuado y extrapolado; situación que ha permitido, erróneamente, relacionarlas con aspectos que están fuera de los razonamientos de la teoría.** De acuerdo con esto, nos detenemos a mostrar cómo la pseudociencia se presenta como una dificultad para la divulgación de la ciencia, en específico para la divulgación de la física cuántica. Esto lo abordaremos en el **capítulo 3**.

A partir del análisis de las publicaciones divulgativas se ha observado que una de las características en el discurso divulgativo es la ausencia de reflexión crítica hacia la ciencia, en este caso hacia la física cuántica. En este sentido, en la tesis se busca **reconstruir justificadamente la relevancia**, tanto para la esfera de la filosofía como en el ámbito de la comunicación de la ciencia, **de divulgar el significado epistemológico y ontológico del marco conceptual de la física cuántica. Con ello en mente, se propone una estrategia para la divulgación de las cuestiones fundamentales de la física cuántica**, de modo que se promueva un entendimiento más íntegro de la teoría con el fin de obedecer a uno de los propósitos de la divulgación: fomentar y fortalecer una cultura científica⁵ en la sociedad, cuya finalidad es, entre otras, enriquecer la educación del ser humano.

⁵ Con la noción de *cultura científica* nos referimos a una idea muy trabajada y debatida en el área de la comunicación de la ciencia. A pesar de eso, como primer acercamiento podemos remitirnos a la aportación del físico mexicano Luis Estrada (2009), la cual nos permite comprender a qué se refiere dicha concepción. Estrada mencionó que la cultura científica no sólo implica saber y comprender lo que ocurre en el quehacer científico, sino también entender su significado, conocer de dónde viene y a dónde quiere ir, así como reflexionar sobre sus posibles consecuencias; en esta idea se hace un llamado a contemplar la historia y filosofía de la ciencia.

Considerando lo anterior, a lo largo del **capítulo 4** se construye una estrategia en la que se reúnen varios elementos que el divulgador de la ciencia tendría que valorar para mostrar un discurso en el que se involucren los debates y razonamientos que se presentan en los fundamentos de la física cuántica, y en este sentido, promover una divulgación guiada por la idea de cultura científica.

Cuando hablamos de una divulgación de la física cuántica en la que se tomen en cuenta los debates fundamentales puede surgir la pregunta: ¿quién sería el público objetivo para este tipo de divulgación? La respuesta puede resultar simple: dicho público podría abarcar tanto a los estudiantes de física que están interesados por la teoría y que al mismo tiempo buscan indagar en sus fundamentos, como también a los filósofos que buscan tener un primer acercamiento a las cuestiones de la física cuántica que han estimulado discusiones filosóficas. Además, por considerarse divulgativo, es un tema que también debería estar al alcance de los interesados que no necesariamente estén inmersos en estas disciplinas.

Por lo dicho hasta aquí podría emerger otra pregunta: ¿por qué interesarse en divulgar los debates que surgen de los fundamentos de la teoría cuántica? Antes de tratar de responder es necesario enfrentarnos a otras cuestiones: ¿cuál es la relación existente entre física cuántica y filosofía?, ¿qué debates fundamentales podría tener una teoría tan exitosa como lo ha sido la física cuántica? Para dar cuenta de estas últimas preguntas, en la siguiente sección presentaremos brevemente los argumentos concernientes a la teoría cuántica que convergen con preocupaciones de interés filosófico, pues dichos argumentos se abordarán con mayor precisión y profundidad en el contenido de la presente investigación.

Vínculo entre filosofía y física cuántica ⁶

A pesar del éxito de la física cuántica, la teoría carece de una interpretación satisfactoria, pues en la interpretación más difundida, la interpretación de Copenhague⁷, se presentan dificultades conceptuales y características que parecen ser contradictorias y

⁶ Para conocer sobre el vínculo entre física y filosofía se recomienda consultar el APÉNDICE B.

⁷ También conocida como interpretación ortodoxa o interpretación estándar. Llamarla interpretación ortodoxa refiere a la interpretación que ha dominado entre los físicos al abordar la mecánica cuántica, es esta interpretación la que comúnmente se expone a los estudiantes a nivel universitario. A lo largo de la tesis nos referiremos a ella de manera indistinta.

contraintuitivas, situación que ha estimulado importantes reflexiones filosóficas. Desde sus inicios, la interpretación de Copenhague —considerada también como el “dogma de Copenhague” (Jammer, 1974)— ha recibido varias críticas por parte de algunos físicos que no están de acuerdo con sus implicaciones ontológicas.

Antes de presentar las controversias que surgen a partir de la interpretación de Copenhague, señalaremos las discrepancias que comenzaron a surgir en los inicios de la teoría cuántica, una época que se ha reconocido como precuántica. En esa etapa se hicieron evidentes divergencias con los principios que se tenían en las teorías pertenecientes a la física clásica. Una de ellas surgió con el concepto de discontinuidad de la energía que se hizo visible a partir de la propuesta de Max Planck, en 1900, quien analizó la relación entre la radiación y la materia. La aportación de Planck dio solución a lo que se conoce como catástrofe ultravioleta; esa dificultad surgió de la insuficiencia de las teorías de la física clásica para explicar la radiación que emiten los cuerpos en función de su temperatura. El físico alemán supuso que la energía se absorbe y se emite en paquetes de energía, los cuales fueron llamados cuantos de energía, de ahí saldría la idea de la discontinuidad. Esto se oponía a los supuestos establecidos por la física clásica, en donde se pensaba que la energía se comportaba de manera continua y se podía transmitir en cualquier cantidad.

Posteriormente, en 1924, a partir de la aportación de Planck, el físico francés Louis de Broglie propuso que las partículas que conforman la materia tienen un comportamiento dual, esto es, actúan como onda o corpúsculo según el experimento realizado. Esta idea también ocasionaría controversia pues anterior a ello se suponía que los fenómenos de la naturaleza solamente podrían tener propiedades de ondas o de partículas, pero no ambos.

Por otro lado, en 1925, Heisenberg formuló las relaciones de incertidumbre, con las cuales se implicaría un rechazo al determinismo clásico y también se llegaría a poner en duda la idea de causalidad.

Las nuevas conclusiones que fueron apareciendo después de la aportación de Planck significaron razonamientos que contradecían a ciertos principios establecidos en la física clásica y, a su vez, propiciaron controversias y debates alrededor de ello. Esto lo abordaremos a lo largo del **capítulo 2** y observaremos cómo estos conceptos e ideas han sido trasladados a un lenguaje divulgativo.

Retomemos la interpretación de Copenhague y en qué sentido ha sido objeto de crítica. Para comprender el tipo de problemáticas filosóficas que encontramos en las interpretaciones de la teoría cuántica es importante señalar el tipo de cuestionamiento que

se busca responder. Las preguntas a las que se enfrenta cualquier interpretación son del tipo: “¿qué es lo que nos dice el formalismo de la teoría acerca del mundo?”, o “¿qué tipo de mundo nos está describiendo la teoría?”⁸.

Fue en la Conferencia de Solvay de 1927 donde se dieron los primeros debates entre los físicos involucrados en la creación de la teoría (Bacciagaluppi, G., & Valentini, 2013). No obstante, las disparidades fueron más evidentes cuando se publicó el artículo conocido como EPR⁹ en 1935, el cual representó el mayor reto para la interpretación de Copenhague hasta ese momento. En ese artículo los autores se enfocaron a mostrar la incompletitud de la teoría. Einstein llegó a considerar que las descripciones dadas por esta interpretación para los sistemas físicos en la escala microscópica estaban incompletas y que en un momento dado tales descripciones podrían reemplazarse. Ese mismo año Bohr presentó una réplica al argumento expuesto en el artículo de EPR, lo que provocó una serie de razonamientos a favor de cada una de las propuestas dadas –hubo quienes respaldaban la propuesta de Einstein y otros quienes apoyaban a Bohr–; a este conjunto de réplicas entre ambos grupos se les ha identificado como los debates entre Einstein y Bohr. Por otro lado, también en 1935, Schrödinger publicó otro artículo titulado “La situación actual de la mecánica cuántica”¹⁰, en el que expuso su afamado experimento mental sobre la paradoja del gato. Con este escrito buscó mostrar la aparente inconsistencia de la mecánica cuántica a través de la exposición del fenómeno de superposición de estados (Brush, 1980). Con ello, Schrödinger entró al debate que se había originado con la publicación de EPR y determinó cómo respondería la interpretación ortodoxa ante el famoso caso del gato vivo o muerto. Los argumentos de cada uno se desarrollan a lo largo del **capítulo 2**.

Es importante señalar que las discusiones sobre la interpretación aún siguen vigentes y no se ha llegado a un consenso en el que se acepte, por unanimidad, alguna de las interpretaciones propuestas (Bacciagaluppi, G., & Valentini, 2013; Schlosshauer, Kofler & Zeilinger, 2013). Hoy en día, una de las problemáticas que aparece cuando nos introducimos

⁸ Es importante destacar que a estas preguntas les subyace una postura realista, es decir, se tiene como supuesto que las teorías científicas generan conocimiento del mundo, incluyendo de aspectos inobservables, aquellos que sólo son detectables a través de instrumentos. Esto dicho a grandes rasgos, pues con dicho concepto se desencadena una serie de debates en la filosofía de la ciencia. (Chakravartty, A., 2017)

⁹ Haciendo referencia a las iniciales de cada uno de los autores, Einstein, Podolsky y Rosen. Sin embargo, el artículo llevó el título de “Can Quantum- Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?”.

¹⁰ El título original en alemán fue “Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik”, y se publicó en la revista “Die Naturwissenschaften”, en noviembre de 1935.

al análisis de la interpretación de la teoría es el problema de la medición. Para David Albert (1994), físico y filósofo de la física, el problema de la medición se trata de la principal dificultad en los fundamentos de la mecánica cuántica. Por su parte, Dean Rickles (2008), también físico e historiador de la física, propone que "la mecánica cuántica genera, con mucho, la mayor parte del trabajo dentro de la filosofía de la física. Al ser responsable del problema filosófico de la física: el problema de la medición". Sobre esto, es importante señalar que el problema de la medición no solo es un problema en la interpretación, sino que en él también reside un debate relacionado con posturas filosóficas. En el **capítulo 2** presentaremos dicha problemática a manera de introducción, pues a partir de ella tocaremos la controversia relacionada con el papel de la observación en las mediciones cuánticas. Dicha exposición nos permitirá distinguir cómo esta polémica se ha tratado en las publicaciones de divulgación elegidas.

Considerando lo anterior, es posible afirmar que a través del análisis de las publicaciones divulgativas en torno a la física cuántica se puede rastrear la evolución que ha tenido la divulgación de esta ciencia y evaluar el tipo de divulgación que se le presenta al público no experto. Como hemos expuesto, de manera somera, en la construcción de la teoría cuántica han surgido debates con respecto a sus fundamentos —algunos forman parte de la fase precuántica y otros aún son vigentes—; suponemos que la exposición de ellos en las publicaciones divulgativas ofrecería al público una imagen más completa de esta ciencia y proveería una narrativa más genuina respecto al proceder de la ciencia en general, proporcionando herramientas para fomentar una actitud crítica.

Por último, en relación con la estructura del escrito, antes de comenzar con el capitulado ya expuesto, presentamos un preámbulo en el que introducimos conceptos relacionados con la comunicación y divulgación de la ciencia, los cuales permitirán delimitar la actividad de la divulgación científica y conocer los modelos discursivos de esta actividad; ello nos proporcionará herramientas para realizar el análisis a las publicaciones elegidas.



PREÁMBULO

Acercamiento a las ideas básicas en comunicación de la ciencia

Esta sección se dedicará a introducir algunas ideas y nociones esenciales para la comunicación de la ciencia. Esto nos permitirá dar un primer paso hacia el trabajo de investigación que se realizó en la tesis, enfocada en la divulgación de la ciencia alrededor de la física cuántica. Aquí observaremos en qué consiste la comunicación de la ciencia, y en específico delimitaremos la actividad de divulgación. Así mismo, indicaremos los modelos de comunicación de la ciencia, los cuales actúan como esquemas que analizan las prácticas de comunicación de la ciencia y a través de ellos se ha descrito el proceder de esta actividad.

La comunicación de la ciencia, tomada en cuenta como parte del quehacer científico, consiste, *grosso modo*, en la traducción¹¹ y transmisión del conocimiento. La forma común de representar la actividad de comunicar es a través de un proceso lineal de transferencia

¹¹ Es importante señalar que la actividad de traducir no se refiere solamente a trasladar el significado de los términos a otro idioma, sino que implica un proceso más complejo, en el que se debe comprender la cultura del idioma original como la cultura a la cual se va traducir y así, recrear los significados que se buscan transmitir (Del Río, 2003). Como lo menciona Umberto Eco (2008), se trata de un trabajo de negociación, en el que el traductor selecciona qué elementos del discurso original —en el caso de la divulgación sería el discurso científico— son esenciales para prevalecer en el discurso traducido o divulgado, y qué elementos se pueden omitir sin transgredir el significado original.

de información, el cual va desde un emisor hacia el receptor gracias a un medio de transmisión. En un primer momento, los emisores y receptores del proceso de comunicación de la ciencia son los miembros del círculo de científicos que participan en alguna investigación, es decir, esta comunicación se da cuando se está construyendo el conocimiento. Posteriormente, la comunicación se dirige a grupos más amplios, que pueden ser grupos de colegas en otras áreas o bien, a comunidades que están desconectadas con la actividad científica; es en este último sentido cuando se habla de una divulgación de la ciencia o del conocimiento.

Al considerar lo anterior, observamos, por un lado, que la divulgación de la ciencia podría verse como una de las varias actividades que se desprenden del comunicar la ciencia, y también, se trata de un tipo de discurso que pertenece a una amplia gama de géneros discursivos que se tienen en la ciencia (Myers, 2003); tales discursos se configuran en función del receptor al que se va a dirigir la información.

Hasta aquí se puede advertir que se hace una distinción entre las concepciones de comunicación y divulgación. No obstante, es importante señalar que en reiteradas ocasiones ambos términos han sido utilizados sin distinción en diferentes estudios relacionados con el tema. Para tener mayor claridad de esta diferencia nos detendremos un poco en las conceptualizaciones que se han dado al respecto. Especificaremos las diferencias que nos permitan delimitar ambas actividades y discursos.

¿Comunicación o divulgación de la ciencia?

Cuando se habla de la comunicación de la ciencia como disciplina de estudio se está hablando de una actividad relativamente nueva, por lo que una definición que esté avalada por la comunidad de los especialistas en esta área aún no se ha dado. Cabe señalar que la comunicación de la ciencia como actividad ya se presentaba desde el siglo XVII, pues ya existían textos que tenían como propósito difundir cierto conocimiento a la población, aunque en ese momento este quehacer no era definido como tal. En la actualidad, las definiciones que se proponen varían de acuerdo con el autor; a pesar de ello se puede obtener una noción genérica en la que se comparte la esencia de esta actividad. En este sentido, podríamos hablar de comunicación de la ciencia como la actividad en la que se busca transmitir conocimiento que va desde los expertos hacia otros colegas expertos o hacia otros científicos que no pertenecen al área; o bien, transmitir tal conocimiento a

grupos que no están vinculados con la ciencia que se difunde. Aunque esta acepción es muy amplia, nos ayudará para delimitar otras actividades que pertenecen al gran conjunto de la comunicación. Los subconjuntos de actividades que se derivan del gran universo que llamaremos comunicación de la ciencia corresponden a tareas como la comunicación entre pares, la divulgación, la difusión y el periodismo científico.

Cuando se hace referencia a la comunicación entre pares estamos haciendo alusión a la transmisión del conocimiento que se da entre los mismos integrantes de alguna especialidad. En cambio, cuando se habla de difusión, la información viaja del grupo de especialistas o de investigación hacia otro, sin salir del círculo de científicos. Esta situación se advierte cuando observamos que dentro de las ciencias se presentan campos especializados, en los que a los propios científicos especializados en un área se les dificulta comprender otra área distinta a la suya. Por otro lado, tenemos otra ocupación dentro de la comunicación de la ciencia: el periodismo científico —en los últimos años, esta actividad ha tenido gran auge y tiene mayor presencia en los medios masivos de información—; a través de él se busca comunicar al público los avances científicos y tecnológicos, permitiendo mostrar una relación más cercana con el contexto político, social y cultural. A diferencia de la difusión y de la comunicación entre pares, en el periodismo el transmisor de información no necesariamente se trata de un integrante del grupo de científicos, sino que es una actividad que se lleva a cabo desde otras disciplinas.

Por otro lado, la divulgación de la ciencia la entenderemos como la actividad que busca difundir el conocimiento científico a otras esferas externas al círculo de científicos o bien, a científicos que no tienen una relación cercana con la disciplina o el tema a divulgar. En palabras de Massimiano Bucchi y Brian Trench (2014): se trata de “hacer accesible el conocimiento científico a audiencias no expertas”; es, pues, “la labor multidisciplinaria cuyo objetivo es comunicar, utilizando una diversidad de medios, el conocimiento científico a distintos públicos voluntarios, recreando ese conocimiento con fidelidad y contextualizándolo para hacerlo accesible” (Sánchez Mora, 2002). De acuerdo con lo anterior, es posible observar que las definiciones dadas para comunicación y divulgación son muy similares, como si se trataran de la misma; sin embargo, se marca una diferencia derivada del alcance que cada actividad tiene sobre el público. Teniendo estas distinciones en mente, será la divulgación en la que nos enfocaremos en la presente investigación.

Es necesario hacer hincapié en que la comunicación de la ciencia comprende una amplia gama de tareas que buscan difundir conocimiento a través de cualquier medio. El

discurso desarrollado en esas tareas dependerá de los receptores a los que se pretende transmitir la información, los cuales pueden ir desde los colegas científicos hasta la sociedad en general. En este sentido, en la divulgación se considera que el público meta es aquel que está fuera del grupo de científicos, y que puede, o no, mostrar interés por conocer algún tema científico.

En la divulgación, como una actividad en la que la información generada entre los círculos de científicos se propaga hacia otros individuos que no participaron en la concepción de ese conocimiento, se comienzan a dar por sentado las ideas y conceptos que se establecen en el proceso de investigación científica¹², es decir, los receptores o el público aceptan la información y difícilmente esa información o conocimiento atraviesa el tamiz de la duda. Con respecto a esto, Bruce Lewenstein (2009), investigador dentro del área de comunicación de la ciencia, afirma que el discurso divulgativo muchas veces podría pensarse como “un depósito de conocimientos estables” capaz de cruzar fronteras y capaz de alcanzar a comunidades distintas a los grupos que iniciaron y generaron cierto conocimiento. Es en este sentido que se afirma que en la divulgación de las investigaciones se encuentra el supuesto de la transmisión de un “conocimiento íntegro” (Secord, 2004).

Lewenstein y Secord señalan que en la divulgación se expone el supuesto “conocimiento estable” o el “conocimiento íntegro”, respectivamente, dado que en estos discursos difícilmente se le hace ver al público las vicisitudes por las que pasa una conclusión científica, por lo que se propaga una imagen de la ciencia inexacta o ingenua basada, muchas veces, en el clásico método científico.

En este punto es importante señalar que en el proceso natural de la ciencia los resultados obtenidos se toman en calidad de provisorios: en un momento dada alguna teoría podría modificarse dando como resultado la afirmación de hipótesis distintas y, por lo tanto, arrojar conclusiones diferentes; con ello, se juzga la calidad del conocimiento íntegro y estable.

Al hablar de la idea de transmisión o comunicación del conocimiento suelen surgir varias preguntas como las siguientes: ¿qué es lo que se comunica?, ¿quiénes son los que difunden tal conocimiento?, ¿cómo es el discurso que se emplea? Y si se considera al receptor, al público, que recibe tal conocimiento, pueden emerger otro tipo de preguntas: ¿cómo es recibido tal conocimiento? y ¿qué entendimiento se genera de él? (Myers, 2003;

¹² Exceptuando la fase de comunicación que se da cuando una investigación está en desarrollo y el proceso se establece entre los integrantes de un mismo equipo de investigación.

Secord, 2004). Al tratar de responder estas últimas preguntas, algunas posturas han valorado que se tendrían que tomar en cuenta los distintos contextos en los que el público está inmerso, pues esto influirá en la interpretación y el entendimiento que se genere¹³. En la presente investigación se retomaron las primeras preguntas indicadas al inicio del párrafo, con el objetivo de tener como hilo conductor a los contenidos de los textos divulgativos.

Modelos teóricos en la comunicación de la ciencia

En los estudios que se han realizado sobre la comunicación de la ciencia nos encontraremos con propuestas que buscan delinear esta actividad en función de la comprensión pública de la ciencia y en cómo se lleva a cabo la actividad. Como resultado de esto, se han formulado distintos modelos teóricos para la comunicación de la ciencia.

La clasificación general que se ha dado está compuesta por el modelo de déficit, el modelo contextual, el modelo de especialización y el modelo de participación pública. Esta clasificación ha sido descrita por diversos investigadores en el área; uno de los que frecuentemente aparece en la literatura en el área es Bruce Lewenstein, quien en su artículo “Models of Public Communication of Science and Technology” (2003) delinea a cada uno de los modelos. No obstante, otros autores han propuesto variaciones a dicha clasificación, a las cuales se les han asignado nombres similares. Con respecto a esto último, Montañés Perales (2010) ha mencionado que todas las clasificaciones dadas se pueden agrupar en dos grandes conjuntos: el modelo de déficit y el modelo contextual, dado que los otros modelos propuestos sólo muestran diferencias menores con respecto a las características principales de cada uno de estos dos modelos.

Así mismo, se ha señalado que cada modelo está ligado con algún paradigma concerniente a la comprensión pública de la ciencia. Estos paradigmas han sido clasificados por Bauer, Allum y Miller (2007) como: Alfabetización científica, Comprensión pública de la ciencia, y Ciencia y Sociedad; cada uno de ellos ha de corresponder a una determinada época histórica y se han de distinguir por los objetivos que cada uno persigue. A continuación, se describirá en qué consisten los dos modelos dominantes y cómo están relacionados con los paradigmas referidos por Bauer, Allum y Miller.

¹³ El estudio de los públicos es un área muy amplia dentro de la comunicación de la ciencia que en la presente investigación será imposible abarcar, pues se desviaría de los objetivos que se plantean dentro de la introducción.

Modelo de déficit

Cuando se habla del modelo de déficit se considera que la comunicación de la ciencia se desarrolla como si existiese “un déficit de conocimiento [en la sociedad] que debe ser llenado, con la presunción de que después de solucionar el déficit habrá una mejora” (Lewenstein, 2003). En otros términos, Massarani y Castro Moreira (2004) lo describen como aquel proceso relacional entre quienes producen el conocimiento y sus consumidores. Dado lo anterior, se tendría una relación unidireccional que va desde los que poseen el conocimiento hacia aquellos que se presupone que no lo tienen, es decir, hacia un público pasivo, pues sólo serían receptores de información.

De igual manera, el modelo de déficit se entiende como aquel que considera el conocimiento científico como definitivo y consolidado, en el que el contenido presentado se refiere, primordialmente, a los conceptos propios de la ciencia; a esto, en ciertas ocasiones, también se sumaría la presentación de aspectos relacionados con los métodos y procesos de la ciencia. Por su parte, Myers (2003) indica que en este modelo la información científica cambia su forma textual en el proceso de traducción, después de haber pasado por un proceso de simplificación o deformación, la información que recibe el público podría estar exagerada o enmudecida, situación de la que difícilmente podría ser identificada por el público.

Los principios del modelo de déficit se relacionan con el paradigma de alfabetización científica que surge en la década de los años sesenta hasta mediados de los ochenta, y en cierta manera con el de comprensión pública de la ciencia o PUS¹⁴ en la década de los noventa. Articular el modelo de déficit con el paradigma de alfabetización científica, en el que se presupone la idea de que la ciencia forma parte de la cultura, responde a la tendencia que se observó en los primeros trabajos de comunicación de la ciencia, en los cuales esta idea se mostraba de manera implícita: se consideraba que la sociedad debería estar familiarizada con el desarrollo científico y tecnológico. A la par, alrededor de este paradigma, se observaron actitudes tecnocráticas por parte de los tomadores de decisiones, quienes afirmaban la necesidad de un público culto que fuera capaz de participar, de cierta manera, en decisiones de política científica (Bauer et al., 2007, p. 80).

Por otro lado, con el movimiento por parte de PUS se intensificó el interés de los científicos hacia el público, al percatarse de la actitud que tomaba la sociedad frente a la ciencia. En ese periodo, la sociedad comenzaba a tener una actitud que se podría considerar

¹⁴ Por sus siglas en inglés, Public Understanding of Science.

ambivalente: por una parte, algunos veían a la ciencia con admiración y respeto; y por otro lado, hubo quienes comenzaron a catalogarla como nociva, pues observaban resultados negativos relacionados con la contaminación, y además, se le vinculaba con la fuerte producción armamentista, lo que provocó críticas y desconfianza respecto al quehacer científico (Gregory & Miller, S., 1998; Miller, 2001). En estas circunstancias, el movimiento de PUS se fundamentó en la suposición de que si el público poseía una mejor comprensión de la naturaleza y de los métodos de la ciencia generaría mayor respeto tanto por la ciencia como por los científicos (Sánchez, 2010). La anterior idea se ve respaldada, principalmente, por los propios científicos quienes buscaron justificar sus investigaciones para obtener recursos y financiamiento.

Al reflexionar sobre lo anterior han surgido diversas críticas hacia el modelo de déficit; se menciona que en él se promueve a la ciencia de una manera heroica y positivista, postura que también se ha tratado desde la filosofía de la ciencia (Dornan, 1990). También se ha indicado que, en este modelo, los científicos o los expertos hacen uso de recursos retóricos para determinar qué simplificaciones son las apropiadas y cuáles podrían considerarse distorsiones en la exposición del conocimiento científico para las amplias audiencias. Con referencia a esto último, la actividad de divulgación científica basada en este modelo se ha considerado como una herramienta para promover, defender y difundir las posturas de los científicos, en la que se promueven los propios intereses de los autores, y en la que también se ha visto a la divulgación como un instrumento político dentro de los procesos científicos. Dado lo anterior, se ha señalado que la facilidad de convertirse en un instrumento político se deriva de la creencia y confianza del público hacia los científicos (Hilgartner, 1990; Turney, 1999), quienes difícilmente pondrían en duda la información proporcionada.

En relación con lo anterior es posible advertir que dentro de este modelo se evidencia una actitud de legitimación de la ciencia¹⁵. No obstante, como mencionamos líneas atrás, la confianza hacia los científicos no es un elemento categórico, pues tiene su contraparte: hay quienes muestran desinformación, desconfianza y desinterés hacia la labor científica.

¹⁵ Es importante señalar que la idea de que la ciencia como una empresa social que se legitima a partir de sus resultados, que podrían ser las publicaciones, así como de la presencia del conocimiento científico en círculos que van más allá del propio grupo de individuos que establecieron el conocimiento, es una idea que ha sido manifestada en estudios referentes a la ciencia desde una perspectiva de la filosofía, historia, sociología y de la propia comunicación de la ciencia (Broncano, 2009).

Esto se puede observar cuando nos referimos a los resultados que arrojan algunas encuestas relacionadas con la percepción pública de la ciencia¹⁶.

Modelo de enfoque contextual

El segundo gran modelo en comunicación de la ciencia surge a partir de la influencia de los estudios en esa área desde diversas disciplinas, como la historia, sociología y filosofía, a través de las cuales se buscó tener un análisis más profundo sobre la relación entre ciencia y sociedad. Este modelo se denomina modelo de enfoque contextual, y con él también se han generado diferentes opiniones y variaciones respecto a su conceptualización. A pesar de esto es posible sustraer una noción esencial. Lewenstein (2003) lo ha descrito como aquel modelo que reconoce a los individuos de manera distinta al modelo de déficit; en éste no responden como contenedores vacíos de información, sino que procesan la información siguiendo esquemas sociales y psicológicos en función de las circunstancias personales y contextos culturales en el que están inmersos.

Este modelo resta importancia a la adquisición cabal de cierto conocimiento científico y se enfoca en promover la confianza pública; asimismo, se enfoca en los aspectos sociales y los procesos institucionales de la ciencia, incluyendo a las polémicas que se presentan dentro de ella. Con respecto a la comprensión pública de la ciencia que se pudiera generar, se señala que ella estará basada en elementos que muestren una relación más estrecha con la vida cotidiana y con temáticas relacionadas con riesgos y controversia, y en este sentido, el promover el entendimiento exacto de los conceptos y nociones de cualquier ciencia quedaría en un segundo lugar; puesto que la comprensión intelectual del conocimiento científico por parte del público constituye una pequeña parte de los factores que intervienen en la relación ciencia-público. (Montañés, 2010)

El entendimiento del público se originaría a partir de una relación bidireccional. A diferencia de la relación unidireccional que caracteriza al modelo de déficit, aquí no se

¹⁶ Sobre este tipo de estudios han surgido una serie de cuestionamientos que evalúan sus indicadores y metodologías. Por ejemplo, en la aplicación de estas encuestas en México, como en otros países, se siguen los componentes y principios metodológicos empleados en la Unión Europea y la Fundación de Ciencia de Estados Unidos. Tal situación ha de determinar los resultados, pues no se circunscriben a las características propias de cada población. El análisis de este fenómeno dentro de los estudios sociales de la ciencia, y en particular de la comunicación de la ciencia, proporcionaría información relevante, en principio, sobre la percepción pública de la ciencia de manera general y cómo actuar en los proyectos de divulgación de la ciencia a nivel regional; sin embargo, en este escrito solamente quedará como una mención por no corresponder con los objetivos de la tesis.

presupone la convicción del público para darle un valor a la ciencia, sino que se buscaría construir una relación de confianza a través de la comunicación.

Las críticas que ha recibido el modelo contextual surgen de valorarlo como una versión más sofisticada del modelo de déficit. Steve Miller (2001) afirma que es imposible eliminar el déficit de conocimiento en el público, pues la separación entre el público y los expertos es algo que siempre estará presente, debido a que ambos nunca estarán en un mismo nivel de conocimiento. Por otra parte, en el modelo contextual, al hacer un reconocimiento de las audiencias y al buscar que jueguen un papel primordial en las decisiones relacionadas con política científica, se tendría que tomar en cuenta que la respuesta, o el entendimiento, frente a la información podría resultar inesperada e inapropiada para los expertos científicos, dado que se pueden suscitar nociones anticientíficas por las interpretaciones que produzca el público (Montañés, 2010). Por otra parte, al igual que en las controversias dentro de la ciencia, donde los investigadores no llegan a acuerdos, es difícil esperar que el público llegue a resoluciones a partir de la información que se le otorga.

Otros modelos

Tras haber descrito estos dos grandes modelos, ahora sólo se hará una breve referencia de los otros dos modelos descritos por Lewenstein (2003): el modelo de especialización y el modelo de participación pública, con el fin de observar las ligeras diferencias que se presentan en relación a los modelos ya expuestos.

En lo que respecta al modelo de especialización, éste se puede catalogar como un modelo derivado del modelo contextual en el que, a grandes rasgos, se toman en cuenta los conocimientos locales, los cuales cobran importancia por su relevancia en la resolución de problemas. De esta manera se buscaría incluir este tipo de conocimiento en las labores de comunicación de la ciencia. No obstante, este modelo ha recibido críticas respecto a la valoración del conocimiento local, es decir, si se ha de considerar científico o no. Por otro lado, se argumenta que dicho modelo no deja claro cómo contribuiría a mejorar la comprensión de problemas específicos.

En lo que respecta al modelo de participación pública, al igual que el anterior, puede considerarse como una ramificación del modelo contextual. En este modelo, los productos o actividades de divulgación tienen como finalidad una “democratización de la ciencia”. Se

desea que se establezca algún diálogo entre ciencia y sociedad, con el objetivo de obtener la opinión del público, pero sin que éste tenga una intervención en el proceso de la ciencia.

A pesar de los límites que se generan al proponer modelos de comunicación de la ciencia, se sigue presentando la dificultad de circunscribir actividades específicas de comunicación en alguno de los modelos planteados. A partir de esta deficiencia, dentro de la investigación en esta área se ha optado por plantear una coexistencia entre los modelos, la cual respondería al tipo de actividad o producto divulgativo que se esté tratando (Miller, 2001). Por otro lado, se señala que en el lenguaje utilizado para describir a los modelos se esconden ciertos aspectos respecto a lo que se realiza en las prácticas de comunicación de la ciencia. Por lo que, tratar de limitar las prácticas de comunicación a ciertos modelos ocultaría ciertas particularidades de los productos o actividades de divulgación.

Por último, siguiendo a Bucchi y Trench (2014), tenemos que tener claros, al menos, los siguientes términos: divulgación, modelos, déficit, diálogo, participación, expertos, públicos y cultura científica, para el desarrollo de cualquier investigación relacionada con la comunicación de la ciencia. La mayoría de ellos han sido expuestos en este preámbulo, en el primer capítulo nos detendremos un poco más en el concepto de “cultura científica”. Todas estas nociones nos permitirán aproximarnos de una manera más analítica a las publicaciones divulgativas dirigidas a la física cuántica.



CAPÍTULO 1

LA DIVULGACIÓN DE LA CIENCIA; EL CASO DE LA FÍSICA CUÁNTICA

Al igual que en otras ciencias, en la Física surgen ramificaciones: tiene subdisciplinas que cuentan con un mayor grado de especialización. Para quienes están involucrados directamente con esas disciplinas se puede afirmar que cuentan con un entendimiento de ellas. Sin embargo, a medida que existe cierta distancia entre algún área científica y la población que no se ve involucrada en esos temas, la incompreensión de tales asuntos se hace presente.

Atendiendo lo anterior, es factible pensar que quienes no están involucrados en temas de ciencia, les resulte complicado tener una primera intuición sobre lo que consiste cierta área científica. Tal situación de desconocimiento por parte de la sociedad podría ser observada en cualquier campo de la ciencia. Ello, sin duda, se presenta en el caso que aquí nos interesa: la física cuántica. En esta rama de la física los estudios de comunicación de la ciencia han advertido una gran brecha entre ciencia y sociedad, y en este sentido, a través de la divulgación se busca crear un puente para estas dos esferas.

Hoy en día la física cuántica ha sido considerada como una de las teorías científicas más exitosas debido al alto grado de precisión en sus predicciones; además, ha trascendido en diversos avances tecnológicos. La relación entre la tecnología y la física cuántica podría considerarse como el vínculo más directo con la sociedad. Sin embargo, esta relación no es evidente para muchos. Ante esta perspectiva, entra en juego la divulgación de la ciencia, la cual busca, como uno de sus propósitos, mostrar dicha relación.

Como sucede con otras disciplinas, la tarea de divulgar la física cuántica se justifica, muchas veces, con mostrar los resultados tecnológicos que se han derivado de la ciencia, pues con la tecnología sería posible crear un vínculo más directo con el que la sociedad se encuentre familiarizada. No obstante, este argumento de apelar a la tecnología para mostrar la relación entre ciencia y sociedad no es suficiente.

Un planteamiento más básico para justificar la divulgación de cualquier ciencia radicaría en “satisfacer a la voluntad de conocer como una necesidad esencial del ser humano”, aludiendo a palabras de Reichenbach (1996). De esta manera se puede observar que un objetivo de corte filosófico sobrepasa aquellos que tienen que ver con mostrar la relación de los avances tecnológicos y su impacto en la sociedad, sin desvalorar los avances tecnológicos que surgen de la ciencia.

En este primer capítulo observaremos cuáles son los objetivos que se persiguen en la labor de divulgación de la ciencia y cómo ellos se trasladan a la divulgación de la física

cuántica. Asimismo, expondremos la importancia de promover una divulgación de la física cuántica en la que no solamente se apele a su relación con los avances tecnológicos, sino una en la que se engloben las controversias que se presentan en sus fundamentos. Al término del capítulo se presentarán algunos ejemplos de textos divulgativos contemporáneos dedicados a divulgar la cuántica, esto con el objetivo de mostrar su presencia en épocas actuales y ver, de manera somera, cuál es la tendencia en sus objetivos de su discurso divulgativo.

1.1

Importancia y objetivos de la divulgación científica

Para hacer notar la importancia de la divulgación de la ciencia para la sociedad, así como para la ciencia misma, es necesario voltear a ver sus objetivos a través de los distintos medios en que se presenta (conferencias, revistas, libros, exposiciones, programas de radio y televisión, espacios en internet, etcétera)¹⁷.

Al dirigirnos a los estudios de la comunicación de la ciencia y, a su vez, de la divulgación de la ciencia, observamos que el surgimiento de esta disciplina está vinculado con la idea de “las dos culturas”, la cual es un punto de referencia para estudiar la relación y separación entre ciencia y sociedad. La noción de “las dos culturas” surgió en 1959 gracias a la conferencia que impartió el físico y novelista inglés C.P. Snow. En su discurso se evidenciaba una brecha entre las ciencias naturales y las humanidades en un contexto a finales de la década de los cincuenta. Snow advertía de la necesidad de una “tercera cultura” para crear un puente entre humanistas y científicos. Dicha propuesta generó interés y promovió la discusión sobre la relevancia de la divulgación científica.

Es importante destacar que, aunque esto fue manifestado a mediados del siglo XX, anteriormente ya habían salido a la luz trabajos que buscaban difundir los conocimientos científicos a un público amplio, pero la conferencia pronunciada por Snow se destacó por exhibir la importancia de analizar y reflexionar sobre la producción de la divulgación científica para el público.

¹⁷ Es importante destacar que muchas veces los objetivos al divulgar ciencia están determinados en función del público al que se presenta.

El “anticientificismo” fue otro factor que apoyó la idea de promover a la divulgación científica. Durante la década de 1960, se percibía una actitud “anticientífica” por parte de varios grupos sociales; en este contexto, dentro de la comunidad científica surgió una preocupación por hacer ver a la sociedad la utilidad y los beneficios que podría ofrecer la ciencia.

Ahora bien, los objetivos de la divulgación científica pueden estar relacionados con dos grandes aspectos, según la clasificación dada por Ana María Sánchez Mora (2010): propósitos culturales y cuestiones sociopolíticas. En los próximos párrafos nos detendremos a analizar estos dos puntos importantes para la divulgación científica.

Desde la perspectiva relacionada con la cultura se argumenta que la divulgación de la ciencia debe promover una cultura científica, categoría que puede presentar variaciones para referirse al papel de la ciencia dentro de la cultura general de un país o de otro contexto cultural (Bucci, M; Trench, 2014). Sobre ello, Luis Estrada (2002, 2014) afirma que la ciencia es un ámbito que se encuentra oculto en la cultura contemporánea, por lo que se presenta la necesidad de corregir esta “anomalía”. Por otro lado, también nos dice que la ciencia es un producto humano que busca entender la naturaleza. En este sentido, si aceptamos lo anterior y valoramos a la ciencia como tal, como un producto humano, la ciencia sería parte de la cultura general, como si se hablara de otras disciplinas, como cívica o artística.

Al reconocer lo anterior, la divulgación científica actuaría como un medio para fomentar y alcanzar una cultura científica, y así, a la divulgación se le podría considerar como una actividad de responsabilidad social. Para Luis Estrada, hablar de cultura científica es hablar de un planteamiento en un sentido profundo, en el “que implique no sólo conocimiento sino una participación de la vida y la actitud, de la pasión y la crítica que las prácticas científicas conllevan”.

Además de reconocer que la ciencia se trata de una actividad humana como ya se ha mencionado, la divulgación de la ciencia tendría como objetivo mostrar al público el proceso que sigue la ciencia y sus características para alcanzar el conocimiento científico. En otros términos, se promovería un entendimiento del trabajo que hay detrás de toda conclusión científica, del proceder de la ciencia, de las dificultades a las que tiene que enfrentar; ya sean conflictos técnicos, teóricos o sociales. Con ello, se fomentaría una actitud crítica frente a los fenómenos sociales que intentan promover algo aparentemente científico, pero

que en realidad no lo son y que solamente provocan confusiones y malas interpretaciones por parte de la sociedad.

Para ampliar un poco esta última idea, es menester reiterar que uno de los objetivos que se pretenden con la divulgación científica es evitar o eliminar los engaños que en ocasiones se hacen pasar como divulgación científica (Sánchez, 2010), pero que, por el contrario, caen en el ámbito de la pseudociencia¹⁸.

En este sentido, el filósofo León Olivé (2000) proporciona dos razones por las cuales la actividad de divulgar ciencia cobra importancia dentro de la cultura actual. Menciona que la divulgación es la fuente más importante en donde pueden informarse aquellas personas interesadas que no son especialistas y que buscan tener idea de los conocimientos científicos. Además, es la principal responsable de la formación de la imagen que la opinión pública tiene sobre la ciencia, la cual es relevante, pues se trata de la idea que las personas tienen acerca de lo que es la ciencia, de por qué la ciencia importa y puede confiarse en ella y por qué es aceptable gastar socialmente en ella. Al planteamiento de Olivé se podría agregar otra razón propuesta por Pierre Fayard (2004): la actividad de comunicar ciencia permite formular los logros de la ciencia en lenguajes específicos que aseguran la continuidad de la transmisión de conocimientos.

Lo dicho hasta aquí ha de englobar los propósitos culturales; para Sánchez Mora (2010) hay un segundo aspecto al que se inclinan los propósitos de la divulgación: la dimensión sociopolítica. Las intenciones que se expresan a partir de este argumento mostrarán una mayor relación con la descripción dada por el modelo de enfoque contextual¹⁹. En este sentido, se habla de una divulgación de la ciencia que tiene como finalidad educar ciudadanos capaces de formar un juicio sobre algún tema científico y, del mismo modo, tener ciudadanos activos que puedan involucrarse en temas científicos que atañen a la comunidad a la que pertenecen.

Con respecto a la relación establecida entre la divulgación de la ciencia y la política, Pierre Fayard sostiene que dentro del discurso divulgativo es posible esconder mensajes ideológicos bajo la apariencia de una ciencia objetiva (En: Sánchez, 2010). Tal situación se

¹⁸ Sobre esto habrá que poner atención en el presente estudio, pues estas dificultades se hacen presentes dentro de algunos trabajos “divulgativos” de la física cuántica. Como se ha mencionado con anterioridad, dentro de la amplia gama de textos divulgativos que han surgido sobre la temática se encuentran algunos que difunden una interpretación errónea de lo que se postula en la teoría. Esta situación será un tema que se abordará en el tercer capítulo de esta tesis.

¹⁹ Cfr. PREÁMBULO

puede advertir con mayor facilidad, por ejemplo, en el periodismo de ciencia, cuando surgen noticias científicas que muestran un vínculo con aspectos políticos o económicos. En este sentido, la divulgación de la ciencia también funciona como una herramienta para que la población esté informada sobre algún tema en específico y, en un momento dado, obtener aprobación social y en última instancia lograr una aprobación gubernamental que permita obtener recursos que beneficien a la investigación científica. (Montañés, 2010; Olivé, 2007; Zamora, 2005)

Las intenciones sociopolíticas no sólo se limitan a este tipo de ejemplos, sino que también han de comprender las relaciones de política interna dentro de los procesos científicos. Es decir, también hay que contemplar que el proceso de divulgación de la ciencia podría mostrar u ocultar intereses particulares de quienes divulgan, ligados a la obtención de beneficios determinados, como procurar defender ideas teóricas propias de un equipo de investigación en contraposición con otras posturas que representen diferencias con lo que se propone. De esta manera, la divulgación de la ciencia también funcionaría como una herramienta para promover, defender y difundir las posturas de alguna línea de investigación dentro de una disciplina científica.

En relación con lo dicho hasta aquí, se podría aludir a la tendencia que siguen las publicaciones divulgativas en torno a la física cuántica, donde la mayoría de los textos están enmarcados dentro lo que se ha conocido como interpretación de Copenhague; en ellos se presenta la teoría a partir de esta postura que, si bien es la que ha tenido mayor apogeo, no es la única. En este aspecto, es común encontrar que en esos textos las discusiones fundamentales que están implícitas en la interpretación ortodoxa son excluidas. Al seguir esa tendencia se presenta una visión parcial de la física cuántica. Sobre esta idea se buscará profundizar en los próximos capítulos de esta tesis.

Habiendo observado los propósitos que se pretenden alcanzar a partir de ambas vías, la cultural y la sociopolítica, podemos manifestar que tales posiciones no son opuestas, sino que las dos pueden coexistir en los trabajos de divulgación. Esta mezcla se puede identificar al observar los objetivos que se manifiestan en los productos de divulgación; ya sea que estén expresados de una manera explícita o de manera implícita y que se revelan al hacer un ejercicio de análisis. Tomando esto en cuenta, en la presente tesis hacemos un examen para extraer los propósitos que se siguen en los textos de divulgación elegidos.

Desde un sentido más amplio, sin abandonar las dos posturas que hemos expresado, la actividad de divulgar ciencia se puede entender desde un primer acercamiento como un

intento de aproximar a la sociedad al conocimiento científico; por otro lado, también sería una actividad con la cual se pretendería estimular la curiosidad de quienes la perciben y expandir su bagaje cultural; asimismo, a través de la divulgación se podría despertar el interés por conocer más a fondo alguna ciencia en particular y, de cierta manera, fomentar vocaciones, pues contribuiría a la incorporación a profesiones orientadas a las áreas científicas. Además, como ya se ha mencionado, los productos de divulgación actuarían como mediadores entre la población y los científicos, y proporcionarían herramientas para que la sociedad genere, en un momento dado, una opinión sobre el trabajo científico.

La divulgación de la ciencia puede ser, pues, utilizada como una herramienta que complementa la educación formal, pues a diferencia de esta última no se pretende que el público tenga una comprensión cabal de algún tema en particular, sino que el objetivo es más simple: generar entusiasmo por algún tema, y que el público pueda apropiarse, en cierto grado, del conocimiento que se haya transmitido.

1.2

Vigencia y perspectivas en la divulgación de la física cuántica

En esta sección mostraremos que la divulgación de la física cuántica aún sigue presentándose en formato de publicación editorial. Nos enfocamos en ese tipo de textos, como medio de comunicación, pues son los que nos interesan en la tesis. Para evidenciar el carácter actual de estos escritos presentaremos algunos que se han publicado recientemente, esto con la intención de observar los objetivos que persiguen los autores, así como la justificación a la que ellos hacen referencia para divulgar esta disciplina. Con ello, descubriremos, en cierto sentido, la tendencia de su contenido, pues al conocer un poco los objetivos nos permitirá formarnos una idea del contenido que desarrollan los autores. A partir de ello buscamos distinguir en qué medida se hace referencia a los debates fundamentales de la teoría.

Podría parecer que el interés por las dificultades que se presentan en los fundamentos de la teoría no es algo actual, sin embargo, en una encuesta realizada dentro de una conferencia en 2011 titulada “Quantum Physics and the Nature of Reality” (Schlosshauer et al., 2013) se evidenció que no hay un consenso sobre el significado físico de la teoría cuántica; esta misma idea es expresada por Bacciagaluppi y Valentini (2013), quienes

manifiestan los actuales disentimientos entre los físicos dedicados al área. En ese sentido podemos afirmar que las discusiones referentes a los fundamentos de la física cuántica no son un tema del pasado y, por tanto, tratar estas cuestiones en los textos de divulgación significaría una difusión más íntegra de la teoría. Lo último tiene ventajas, pues permitiría al lector, a pesar del éxito que ha tenido la teoría, darse cuenta de las controversias que existen en ella y en un sentido general, ver el proceder de la ciencia.

Es importante destacar que en la actualidad siguen surgiendo textos de divulgación que hablan de la física cuántica, pero también hay que señalar que dentro del conjunto de publicaciones que en sus títulos aluden a los términos de “cuántica” o “cuántico” y que son catalogados como divulgativos, podemos encontrar algunas publicaciones que utilizan los conceptos propios de la teoría para extrapolarlos hacia otros campos no científicos; por ejemplo, podemos encontrar títulos como: *El secreto de la vida cuántica*, *Inteligencia cuántica*, *La empatía cuántica*, *Liderazgo cuántico*, *El perdón cuántico*, entre muchos otros. Por el momento no nos detendremos en esto, pues de ello se hablará en el tercer capítulo de esta tesis. La acotación la hacemos para señalar que entre la gran cantidad de publicaciones que se dicen divulgativas de la teoría podemos encontrar textos en los que la exposición no pertenece a una descripción adecuada de ella.

A continuación, expondremos rápidamente algunos textos divulgativos que abordan la física cuántica; en primera instancia para mostrar la vigencia que siguen teniendo en la actualidad, y en segundo lugar, para obtener de ellos los objetivos que los autores presentan y observar si se sugieren los disentimientos que han surgido en los fundamentos de la teoría. Esta pequeña revisión nos permitirá, en alguna medida, advertir la tendencia actual de la divulgación escrita de la física cuántica. La secuencia de presentación responderá al año de publicación de los libros.

Física cuántica para dummies (2009) de Steven Holzner ²⁰

Este texto pertenece a una serie de publicaciones que se ha vuelto popular por difundir textos introductorios a una gran variedad de temas. Una de las propuestas que se plantean en estos libros es invitar al lector a no seguir la continuidad del capitulado, sino que él podría consultar cualquier sección del libro en el orden que se desee. Es decir, es posible hacer

²⁰ Traducción del título original *Quantum Physics for Dummies*.

saltos en el contenido del texto sin perder algún hilo conductor, dado que cada capítulo, se supone, es independiente uno de otro.

El libro de esta colección dedicado a la física cuántica apareció en 2009 bajo la autoría de Steven Holzner, físico y profesor de la Universidad de Cornell. El autor menciona que la manera en que se estructura el libro obedece a la característica que hace representativos a la serie “para dummies”, es decir, el lector podría elegir cualquier tema sin preocuparse por las páginas previas.

En las primeras páginas el autor advierte cuál es el público al que está dirigido el texto. Menciona que “es para aquellos que están interesados en el tema y que cuenten con bases matemáticas y de física”; señala que el lector encontrará formulaciones matemáticas, pero no profundizará en sus detalles matemáticos. Al tener presente esta característica se puede advertir una delimitación respecto al público lector. A pesar de que se clasifique como divulgativo su contenido no sería atractivo o recomendable para alguien que no esté relacionado con estas áreas. Sobre ello, Steven Holzner también señala que el contenido se diseñó pensando en el público como si fueran los estudiantes de física que están confundidos con esta área de la física. Lo que promete el autor de su contenido es:

Este libro presenta los conceptos que se necesitan saber, pero no se ven muchos experimentos mentales que se relacionan con gatos o universos paralelos. Me concentro en las matemáticas y cómo se describe el mundo cuántico. (Holzner, 2009)

Con la cita anterior el autor nos muestra su postura frente a los objetivos de su discurso, nos indica que se centra en las matemáticas de la teoría y las descripciones de los fenómenos cuánticos, dejando de lado las paradojas que han surgido con los experimentos mentales, con ello también se dejan de lado los temas que suponen controversias en los fundamentos de la teoría.

Conversaciones de Física con mi perro (2009) de Chad Orzel ²¹

Otra publicación reciente dedicada a divulgar la teoría cuántica es *Conversaciones de Física con mi perro (2009)*, traducida hasta la fecha a nueve idiomas. El autor es Chad Orzel, físico de la Universidad de Maryland. El texto trata de una historia de ficción donde el personaje principal es un profesor de física atómica y óptica cuántica que decide adoptar a una

²¹ Traducción del título original *How to Teach Quantum Physics to your Dog*.

mascota llamada Emmy, una perrita con la que logra entablar conversación y a quien le explica cómo funciona la naturaleza a través de la física.

En las primeras páginas, desde el personaje del profesor se señala la supuesta diferencia entre la forma en que los humanos y los perros se acercan a la física cuántica: para los humanos acercarse a la física cuántica podría resultar desconcertante y perturbador por presentar fenómenos que van en contra de nociones que acompañan a nuestra intuición; por otro lado, esta situación no se presentaría en un perro, menciona el profesor, pues ellos están acostumbrados a enfrentarse al mundo con menos ideas preconcebidas, es decir, serían capaces de aceptar lo inesperado, pues no siguen alguna lógica posible en los sucesos. En este sentido, los perros “son más receptivos”, y para estos animales “las maravillas de la mecánica cuántica parecerán más asequibles”. Así, el autor considera a los perros como un público más receptivo a las ideas y fenómenos descritos por la física cuántica.

Se comprende la idea del autor de representar al público a partir de la figura de su mascota, como un público receptivo y libre de creencias o prejuicios para entender la física cuántica; sin embargo, la relación que hace es un aspecto criticable desde la divulgación de la ciencia pues se estarían subestimando las características propias del público, dado que todo público cuenta con un bagaje de conocimientos previos los cuales deberían ser considerados al momento de diseñar el discurso de divulgación. En este sentido, el autor reproduce el modelo de déficit en su discurso —una de las características en este modelo es alfabetizar científicamente a quienes no cuentan con dicho conocimiento—, en donde se presenta a un experto en la materia quien enseña o educa a otro personaje, su mascota, que desconoce del tema y está atento a lo que el experto expone, como si fuera una *tabula rasa* a la que habría que imprimirle tal conocimiento. Por otro lado, la relación que el autor hace entre el personaje de Emmy, la mascota, que caracteriza al lector o al público, es una analogía que podría no ser del agrado para el lector²².

Con respecto a los objetivos que se persiguen en esta publicación divulgativa, el autor no los expresa de manera concreta, sin embargo, hace referencias indirectas a ellos. El autor dice que las conversaciones con Emmy, su mascota, narradas en su libro serán útiles “para aprender a discutir sobre mecánica cuántica con humanos”. Por otro lado, además de mostrar las explicaciones de los fenómenos cuánticos también busca exponer las

²² En este sentido, sería recomendable que los productos de divulgación sean diseñados a partir de estudios y análisis del público al que serán dirigidos, teniendo en cuenta que el público no carece de creencias y conocimientos previos.

“discusiones que surgen de las extrañas predicciones teóricas como de los experimentos que demuestran esas predicciones”. El autor indica que tales explicaciones y discusiones fueron “seleccionadas según lo que pueda resultar más interesante a los perros y también para ilustrar las partes que los humanos consideran más sorprendentes”.

Por otro lado, la disposición del texto de Orzel se caracteriza por mostrar en cada capítulo el diálogo entre el profesor y su mascota. A ese diálogo le acompaña, a manera de anexo, una explicación detallada de los principios físicos correspondientes a los temas tratados.

Desde la introducción del relato, el profesor le explica a su mascota en qué consiste la física cuántica y hace referencia a la relación que se ha presentado entre esta teoría y la filosofía. Para mostrar esto, el autor indica que “los efectos de la teoría cuántica en la ciencia van más allá de lo meramente práctico y han obligado a los físicos a lidiar con cuestiones filosóficas” (Orzel, 2010, p. 12); para el autor las cuestiones filosóficas tienen que ver con los conceptos de medición y realidad.

Es destacable señalar que Orzel hace visible las preocupaciones que se presentan con la interpretación de Copenhague. Por ejemplo, escribe:

El proceso inexplicable del colapso de la función de onda recuerda a la famosa historieta de Sidney Harris sobre un científico que escribía «Entonces, se produce un milagro» como segundo paso de un problema. En la ciencia normal no caben los milagros, y la idea de colapso de Copenhague suena demasiado a milagro para aceptarla sin más.

La mayoría de los físicos, sobre todo los experimentales, se contentan con utilizar la idea del colapso de la función de onda como un atajo en los cálculos para meterse de lleno en la predicción y en las mediciones del mundo físico, para lo cual la teoría cuántica funciona sorprendentemente bien. En esta interpretación basada en la idea de «calla y calcula», el problema de encontrar una explicación coherente para las medidas cuánticas se deja a un lado y se reserva para los filósofos. Quizá surja alguna teoría mejor en algún momento, pero, hasta entonces, tendremos que hacer lo posible con lo que tenemos, que, por otro lado, es mucho. (Orzel, 2010, p. 86)²³

Es necesario señalar que la cita anterior podría parecer fuera de lugar, pues hasta ahora no hemos presentado con mayor profundidad las controversias que surgen de la interpretación de Copenhague, las cuales se detallarán a lo largo del segundo capítulo. Sin

²³ Viñeta a la que hace referencia la cita:



embargo, resulta importante referirla para mostrar que en este texto el autor evidencia e introduce parte de las polémicas que subyacen en los fundamentos teóricos de la cuántica.

Chad Orzel enfatiza que a pesar de que la teoría cuántica muchas veces pareciera extraña o fantástica, se trata de una ciencia en la que los extraños efectos predichos por ella son reales, pues sus predicciones extrañas han sido verificadas experimentalmente, y con ello hace alusión a una de las características esenciales en el proceder de la ciencia.

*La increíble historia de la mecánica cuántica (2010) de James Kakalios*²⁴

Otra publicación en la que se busca divulgar la física cuántica es *La increíble historia de la mecánica cuántica* (2010) de James Kakalios, profesor de física de la Universidad de Minnesota, conocido por sus trabajos de divulgación en los que explica la física que hay detrás de los poderes en los personajes de superhéroes. A partir de esas historias, busca motivar a los jóvenes para que se involucren en el campo de la física, en otros términos, promueve vocaciones científicas, como lo señala el propio autor.

Kakalios menciona que este texto está dedicado a las personas interesadas, pero no expertas, en la mecánica cuántica, principalmente a quienes estén interesados en la relación entre cuántica y tecnología, atraídos por la pregunta de cómo la mecánica cuántica subyace en los dispositivos que están presentes en nuestra vida diaria. Al igual que otros autores, menciona que a la mecánica cuántica siempre se le ha vinculado con adjetivos de rareza e incomprendibilidad, pero señala que no por ello el entendimiento de esta teoría tendría que considerarse imposible. Además, menciona que la intención del texto es explicar los principios básicos de la cuántica que permitieron las aplicaciones de la física en la tecnología, dejando de lado las cuestiones fundamentales relacionadas con las interpretaciones alrededor del problema de la medida:

Este libro está dirigido a personas no expertas interesadas en aprender cómo la mecánica cuántica subyace a muchos de los dispositivos que caracterizan nuestro moderno estilo de vida. Las reflexiones sobre la interpretación de la teoría cuántica y el "problema de medición" son fascinantes, desde luego, pero las discusiones filosóficas por sí solas no inventaron el transistor. [...] Como no soy un historiador de la ciencia, no volveré sobre los pasos de los físicos pioneros que lideraron la revolución cuántica, sino que me centraré más bien en explicar los principios físicos que descubrieron y sus aplicaciones en la física del estado sólido. (Kakalios, 2010, p. XV)

²⁴ Traducción del título original *The Amazing Story of Quantum Mechanics*.

Es evidente observar que el propósito y justificación del autor para mostrar la física cuántica a un público amplio está basado en los dispositivos tecnológicos que se desarrollaron a partir de la teoría. Como habíamos mencionado, el recurso de mostrar el vínculo entre ciencia, tecnología y sociedad es uno de los que se utilizan con mayor frecuencia en la divulgación y en este texto es muy claro. También hay que destacar la delimitación que el autor establece desde las primeras páginas sobre el contenido que el lector encontrará en el texto y qué no.

El Universo cuántico. Y por qué todo lo que puede suceder, sucede (2011)
de Brian Cox y Jeff Forshaw ²⁵

Ambos autores de este texto son físicos de la Universidad de Manchester. Brian Cox es un divulgador muy reconocido en Reino Unido que ha participado en programas producidos por la cadena de televisión BBC, los cuales han tenido gran difusión. Este texto fue publicado por primera vez en inglés en el año 2011 y fue hasta 2014 que se publicó su traducción al español. En su introducción, los autores dicen:

Cuántico. La palabra es al mismo tiempo evocadora, desconcertante y fascinante. Dependiendo de cuál sea su punto de vista, es la constatación del profundo éxito de la ciencia o un símbolo del limitado alcance de la intuición humana en nuestra lucha con la innegable extrañeza del mundo subatómico [...] No importa en absoluto si [la mecánica cuántica] es evocadora, desconcertante o fascinante: es simplemente una teoría física que describe cómo se comportan las cosas. (Cox, B.; Forshaw, 2014, p. 11)

Al observar la cita anterior vemos que los autores reducen el carácter desconcertante o fascinante que se le ha atribuido a la teoría y señalan que lo que merece la atención es la capacidad explicativa de la teoría, la cual permite dar cuenta del cómo se comportan las cosas. Seguido de ello, los autores señalan que la teoría cuántica se ha visto vinculada con aspectos de “percepción extrasensorial, sanación mística, pulseras vibratorias que protegen de la radiación, y otras tantas cosas”, y sugieren que para evitar ello sería necesario comprender las explicaciones y predicciones que la teoría proporciona.

Con respecto a esto, plantean como objetivo de su publicación el “desmitificar a la teoría cuántica, por su marco teórico que ha demostrado ser notoriamente confuso, incluso para sus pioneros”. Para llegar a ello, estructuran el texto en dos partes: primero, hacen un breve recorrido histórico desde los inicios del siglo XX para mostrar los problemas que

²⁵ Título original: *The Quantum Universe: Everything That Can Happen Does Happen*.

llevaron a los físicos a abandonar lo que se establecía desde la física clásica; segundo, en capítulos posteriores se dedican a dar explicaciones a ciertos fenómenos y experimentos.

Se enfocan, dicen los autores, en destacar la importancia que esta teoría ha tenido para comprender el mundo de las partículas, consideradas como los elementos constitutivos de la naturaleza y el universo. Indican que la motivación esencial de buscar comprender la naturaleza radica en la curiosidad, un elemento que ha de estar presente en cualquier ciencia. Para ellos, esto cobrará mayor importancia con los cambios tecnológicos que se han derivado a partir del avance científico.

De esta manera, sugieren que a través de la teoría cuántica se comprende mejor el mundo que nos rodea, y en este sentido, esta ciencia ha de satisfacer la actitud humana de la curiosidad por conocer. Este tipo de razonamiento hace alusión a una de las ideas básicas que justifican a la divulgación de la ciencia que hemos mencionado al inicio del presente capítulo: “satisfacer a la voluntad de conocer como una necesidad esencial del ser humano” (Reichenbach, 1996).

Erwin Schrödinger y la revolución cuántica (2012) de John Gribbin ²⁶

En 2012 John Gribbin, astrofísico y divulgador de la ciencia, publicó la primera edición del libro *Erwin Schrödinger and the Quantum Revolution*, el cual lleva doce ediciones hasta el momento. Se trata de un texto biográfico que sigue un estilo expositivo de narrativa histórica. A lo largo del texto Gribbin muestra la vida de Schrödinger y cómo sus contribuciones teóricas se convirtieron en parte fundamental para el desarrollo de la teoría cuántica. De igual manera, el autor muestra otras facetas de la vida de este físico austríaco, por ejemplo, su interés por la filosofía y la religión oriental. Dado que el personaje principal del texto es Schrödinger, el autor también presenta las discrepancias que tuvo el físico austríaco con la interpretación de Copenhague, pues el ideal de Schrödinger se caracterizó por buscar retornar a los principios de la física clásica que habían sido violados por la nueva teoría. A pesar de que Gribbin no dedica una sección para introducir a la obra se puede advertir que, al tomar una postura desde la historia de la ciencia, sí introduce y expone las circunstancias y debates por los que pasó Schrödinger frente a la interpretación de Copenhague, que en ese momento se estaba emancipando. En este sentido, Gribbin

²⁶ Traducción del título original: *Erwin Schrödinger and the Quantum Revolution*

muestra al lector de manera breve los desacuerdos que surgieron respecto a la interpretación de la teoría.

Hasta ahora sólo hemos mencionado textos que en su primera edición fueron escritos en inglés—posteriormente algunos de ellos han sido traducidos a nuestro idioma—. Ahora retomaremos un par de publicaciones cuyo idioma original es el español.

Introducción al mundo cuántico. De la danza de las partículas a las semillas de las galaxias (2014), de David Jou

El autor de este texto es un catedrático de física en la Universidad de Barcelona quien se ha dedicado a la divulgación de la ciencia. Al igual que otros libros que hemos mencionado, el autor destaca lo “misterioso” y “sorprendente” de la física cuántica; advierte que estas características son las que podrían atraer a las personas no especializadas que buscan comprender en qué consiste esta ciencia.

Los objetivos que persigue Jou con esta publicación son principalmente dos. El primero de ellos es mostrar los alcances tecnológicos que se han dado a partir de la teoría, situación que reflejaría la relación de esta ciencia con la vida cotidiana; el segundo, es mostrar las paradojas implicadas en la teoría. Al observar los objetivos que plantea el autor vemos que su texto perseguirá los propósitos culturales de la divulgación, como los denomina Sánchez Mora (2010); no obstante, no se restringe a ello, sino que ha de tomar en cuenta las características de la teoría cuántica en las que han surgido paradojas y que han estimulado discusiones al respecto. Sobre esto, es importante señalar que el autor presenta a la teoría desde la postura de la interpretación de Copenhague.

En su texto encontramos un capítulo titulado “Conciencia”, en el que habla de los lazos que se le han designado a la teoría con el arte y la espiritualidad. En ese capítulo se percibe una sutil crítica a esos vínculos pero deja abierta la puerta para que los lectores puedan o no creer en dichas relaciones; este modo de proceder en la divulgación es cuestionable y hasta podría considerarse inapropiada pues no se establecen límites claros de los alcances de la teoría.

Por otra parte, Jou alude a algo que se ha mencionado aquí anteriormente en relación con la vigencia de los textos de divulgación vinculados con la física cuántica, pues hace un señalamiento de la popularidad que ha tenido la teoría en tiempos recientes, la cual es posible advertir con el “número de obras de divulgación sobre este tema” como con “el ritmo de publicación”.

La puerta de los tres cerrojos (2011) de Sonia Fernández Vidal

Este texto ha alcanzado la popularidad entre los jóvenes interesados en esta rama de la ciencia; su popularidad comenzó en España y ha traspasado sus fronteras, llegando a traducirse a diversos idiomas como: alemán, italiano, portugués, lituano, catalán, entre otros. La autora, al igual que David Jou, es física de la Universidad de Barcelona dedicada a la divulgación científica.

La clasificación de este texto podría considerarse como una novela científica, o bien, como una narrativa de ficción con contenido de ciencia. A pesar de que el texto se pensó que estuviera dirigido a niños y jóvenes, los lectores no pueden limitarse a ellos, pues podría ser leído también por un público de mayor edad. La historia de ficción que ella propone consiste en el relato de un joven llamado Nico, quien entra a un mundo cuántico; en este contexto, el personaje principal se enfrenta a fenómenos cuánticos. A partir de las aventuras por las que pasa el personaje principal, la autora introduce y describe los fenómenos que desde nuestra experiencia cotidiana podrían considerarse como anti intuitivos. En este texto tampoco se muestra una introducción en la cual se puedan describir explícitamente los objetivos del texto, pero al hacer una rápida revisión en el contenido se puede percibir que el propósito principal de la autora pudiera ser el despertar el interés por el tema a través de la historia de fantasía propuesta, más que dar explicaciones teóricas profundas. Dado que el público meta son los jóvenes, también podríamos decir que un objetivo implícito podría ser el fomentar vocación científica.

Por otro lado, es importante destacar que este tipo de textos, basados en una narrativa de ficción, tienen la capacidad de mantener al lector interesado, siendo una de las dificultades a las que se enfrenta la actividad de divulgar ciencia. De igual manera, también se asevera que a partir de este tipo de textos se genera una mayor comprensión por parte del lector (Dahlstrom, 2014; Green, 2006; Negrete & Lartigue, 2004). En este sentido, la narrativa es considerada como un recurso para la divulgación de la ciencia, la cual, en esta tesis, suponemos sería una herramienta eficaz para divulgar la física cuántica y los debates fundamentales que están implícitos en ella; en el último capítulo de esta tesis abordaremos estas ideas con mayor profundidad.

Los textos mencionados aquí no conforman una lista exhaustiva, pero ayudan a mostrar que hoy en día la divulgación en física cuántica se sigue presentando. Para referir otros textos que buscan divulgar la cuántica y que han sido publicados en años diferentes a los que se mencionaron aquí, se propone consultar el APÉNDICE A de esta tesis, en donde

enlistamos una serie de publicaciones de divulgación que se han desarrollado alrededor de la física cuántica.

En los textos referidos en esta sección es posible observar ciertas características que se reiteran en las presentaciones de los mismos. En la mayoría se habla del carácter misterioso y enigmático de la teoría, aunque algunos advierten al lector que tales calificativos se han trasladado a otros aspectos que caen fuera de la teoría. También, coinciden en mostrar las aplicaciones tecnológicas que se han generado y exhiben de cierta manera la relación, no tan evidente, de la cuántica con los dispositivos tecnológicos que tienen gran presencia en las sociedades actuales. No obstante, la mayoría de los autores desestima las dificultades teóricas que se han presentado a lo largo de la historia de esta ciencia, pues, como se vio en la sección anterior, la tendencia de divulgación de este tema se inclina, por un lado, hacia un modelo de déficit en donde el discurso va desde el experto hacia el no experto de manera lineal; y por otro lado, a pesar de que se evidencien las controversias o dificultades que surgen de los fundamentos de la teoría, no las desarrollan. Es en este aspecto en el que nos enfocaremos en los próximos capítulos al analizar el conjunto de textos de divulgación que se ha seleccionado.

En el siguiente capítulo haremos un recorrido por un conjunto de publicaciones divulgativas en torno a esta teoría y se analizará su contenido. Los textos seleccionados contemplan a las primeras publicaciones que surgieron con la idea de mostrar la física cuántica a círculos sociales externos a los especialistas, hasta llegar a las publicaciones de la década de los setenta, periodo en el que se observó un gran auge de publicaciones divulgativas en todas las ciencias, conocido también como boom de la divulgación; en ese periodo también se percibe un aumento de textos “divulgativos” sobre cuántica que tergiversaron la teoría, sin embargo, sobre ese tipo de textos se hablará en el tercer capítulo.

En las publicaciones seleccionadas localizaremos aquellas características de la cuántica que en su momento provocaban discusiones de sentido filosófico entre los físicos involucrados, así como problemáticas que hoy en día se siguen debatiendo.



CAPÍTULO 2

EXPOSICIÓN DE LA TEORÍA CUÁNTICA EN LAS PUBLICACIONES DIVULGATIVAS

Hubo épocas en que la ciencia y la filosofía
fueron ajenas, si no es que en realidad
antagónicas. Esos tiempos ya pasaron.
Max Planck (1936)

A lo largo de este capítulo se expondrán algunas características fundamentales para la física cuántica, las cuales han resultado relevantes por las controversias que suscitaron desde las primeras etapas de la teoría. Las características que retomaremos son el comportamiento dual de los objetos cuánticos o componentes mínimos de la materia, el indeterminismo y el papel del observador en la comprensión de los fenómenos a escala atómica.

En la primera sección de este capítulo, “Representación del comportamiento dual de los componentes mínimos de la materia en la física cuántica a través de textos divulgativos”, trataremos el comportamiento dual de las partículas planteado por el físico francés Louis de Broglie en 1924; él afirmó que las partículas muestran un comportamiento que refleja características ondulatorias y corpusculares. En un primer momento, la propuesta de De Broglie fue tomada con recelo, pues no se contaba con la evidencia empírica; sin embargo, esta concepción tuvo confirmación experimental pocos años después²⁷.

En el momento en que De Broglie postuló el comportamiento dual, onda-partícula, para los componentes mínimos de la materia trajo consigo una representación que va en contra de nuestra intuición: en nuestra experiencia cotidiana no observamos que los objetos a nuestra escala muestren comportamientos ondulatorios y corpusculares. Por otro lado, esta idea también generó debates y análisis desde un enfoque filosófico en lo que se buscaba dar cuenta de esa nueva manera de comprender la naturaleza en los componentes mínimos de la materia.

En la segunda sección de este capítulo que lleva el título “Representación de la característica del indeterminismo en la física cuántica a través de textos divulgativos”, se abordarán las relaciones de incertidumbre o indeterminismo. Esta noción nos indica, dicho de manera general, que cuando se tienen magnitudes conjugadas no es posible obtener el valor preciso de ambas magnitudes de manera simultánea. Por ejemplo, un par de magnitudes de este tipo serían la posición y el momento; si se quisiera describir con precisión y de manera simultánea la posición y el momento de un electrón no sería posible y, por consiguiente, tampoco podríamos determinar su trayectoria. Una descripción muy popular sobre las relaciones de incertidumbre indica que cuando se conoce con más

²⁷ En 1927, los físicos Clinton Davisson y Lester Germer comprobaron la naturaleza ondulatoria de los electrones a partir de observar patrones de interferencia.

precisión el valor de la posición de una partícula, será menos preciso el valor de su momento, situación que sucede también de manera inversa.

Con respecto a lo anterior, Heisenberg afirmaría que cualquier magnitud medible (v.g. la posición) adquirirá significado sólo si tal magnitud es medida a través de los experimentos:

Si se quiere clarificar qué se entiende por “posición de una partícula”, por ejemplo, de un electrón, se tiene que describir un experimento en el cual la “posición de un electrón” puede ser medida; de lo contrario, tal término no tiene sentido. (Heisenberg, 1927)

Con esto se puede entrever que Heisenberg adopta una postura que alude a una filosofía positivista, o bien, una actitud instrumentalista, pues sólo se considera como “real” aquello que muestra una correspondencia con lo observable, o bien, con los resultados experimentales²⁸.

Los esfuerzos por comprender el formalismo de la mecánica cuántica desde la interpretación de Copenhague²⁹ coexistieron con los inicios del razonamiento positivista en la filosofía de la ciencia, lo que contribuyó a que varios de los físicos que desarrollaron esta interpretación mostraran cierto grado de consentimiento con lo que se afirmaba dentro de esta corriente epistemológica, la cual se ha considerado, hasta cierto punto, como telón de fondo para las posturas que se sostienen en dicha interpretación. De esto último hablaremos en la sección 2.3: “Representación del papel del observador y los instrumentos de medición a través de textos divulgativos”.

Regresando a las relaciones de indeterminación que abordaremos en 2.2, es importante señalar que ellas fueron consideradas como una característica fundamental para la escuela o interpretación de Copenhague, hasta considerárseles como un principio, situación que significó una especie de imperativo para dicha interpretación. A pesar de esto, hay que tener en cuenta que no es la única interpretación existente.

El primero en darse cuenta de las implicaciones filosóficas que se derivaron de este principio fue el propio Heisenberg, pues con el concepto de indeterminismo se establece

²⁸ Cfr. APÉNDICE D: Cuadro comparativo entre interpretaciones realistas e interpretaciones instrumentalistas para la física cuántica

²⁹ Cabe señalar que Heisenberg junto con Niels Bohr, Paul Dirac, Max Born, entre otros, defendieron la interpretación ortodoxa, interpretación estándar o Escuela de Copenhague —interpretación que ha tenido una mayor prevalencia entre los físicos dedicados a esta área, situación que se percibe también en la formación universitaria, en los contenidos de los libros de texto y en la divulgación de esta teoría—. A lo largo de este escrito utilizaremos estas designaciones de manera indistinta

un vínculo muy estrecho con la idea de determinismo causal, la cual es asociada con la ley de causalidad, nociones que han sido estudiadas por la filosofía.

El último punto por tratar en este capítulo será el papel y significado que se le ha otorgado al acto de observación y medición al describir los sistemas a nivel cuántico. Para comprender este tema, tan polémico en la física cuántica, será necesario presentar las ideas básicas que subyacen en la postura epistemológica del realismo científico, y cómo en ella se ha problematizado la observación como elemento clave para la construcción de conocimiento científico. Después de esa presentación, mostraremos los supuestos fundamentales para la interpretación de Copenhague, lo que posteriormente nos permitirá distinguir las complicaciones que han surgido de esta interpretación.

Diferentes lecturas hacia el formalismo matemático de la teoría

Hasta ahora hemos aludido a la interpretación que se le otorgaría al formalismo de la mecánica cuántica, pero no hemos delimitado a qué nos referimos con esto. Cuando hablamos de “interpretación” nos referimos al tipo de respuesta que surge de las preguntas ¿cómo debemos entender los resultados que nos arroja el formalismo matemático? Y ¿qué nos dice el formalismo sobre el mundo?

Ante esto, es importante señalar que el formalismo que se adoptó fue el que propuso el físico austriaco Erwin Schrödinger en 1925, constituido por la ecuación que lleva su nombre y que contiene la función de onda, ψ . Por sí sola, la ecuación de Schrödinger se caracteriza por ser lineal y determinista; explica la evolución temporal de un sistema cuántico, es decir, es capaz de describir la dinámica de los estados de un sistema en distintos tiempos. A la ecuación de Schrödinger la acompaña la regla de Born, propuesta por Max Born, quien señaló que con el cuadrado de la función de onda, $|\psi|^2$, obtendremos, sin entrar a detalles, una lista de posibles resultados de la medición, por ejemplo, nos arrojará la probabilidad de encontrar un sistema cuántico, como una partícula, en una región del espacio, pero no nos dirá un punto específico en el cual se pueda encontrar. En este sentido es que se introduce la probabilidad e indeterminismo en el formalismo de Schrödinger. Por el momento no ahondaremos en esto pues lo retomaremos en la sección 2.3 “Representación del papel del observador y los instrumentos de medición a través de textos divulgativos”.

Al tener presente lo anterior surge la pregunta “¿cuál es el significado físico de la función de onda?”, este cuestionamiento es el que se pretende responder al buscar la interpretación del formalismo y ha significado un cuestionamiento que ha propiciado desacuerdos entre los físicos.

Para simplificar las diversas respuestas para este tipo de cuestionamiento retomaremos la clasificación desarrollada por Mario Bunge (1956), quien engloba las interpretaciones en dos grandes bloques.

Una primera interpretación señalaría, de manera general, que la función de onda, ψ , solamente representa un símbolo matemático sin un significado físico. Por otro lado, una segunda lectura para ψ indicaría que se trata de un símbolo físico que tiene relación con los sistemas materiales como con otros símbolos. La primera interpretación adoptaría una actitud antirrealista y subjetiva, y la segunda sería una versión realista y objetiva. Por el momento, entendamos al *realismo* desde una significación muy esencial: el objeto de estudio muestra una independencia con respecto al sujeto que investiga. Dicha postura, por lo general, es la que se adopta en el quehacer científico. Por otra parte, una posición subjetiva se inclinaría hacia la idea de que la descripción dada por la ciencia corresponde a nuestro conocimiento sobre el sistema y no a la descripción de la naturaleza misma. (De la Peña, 2012, p. 876)

La primera interpretación comprendería la idea de que ψ refiere, indirectamente, a cantidades definidas empíricamente. En este sentido, cuando ψ toma un carácter probabilístico en $|\psi(x, t)|^2 dx$, nos estaría señalando la probabilidad de encontrar el sistema cuántico, el cual puede tratarse de una partícula individual como un electrón, dentro de cierto volumen, dx , en un determinado tiempo (t), al realizarse la medición de la posición de dicho sistema. Quienes apoyan esta perspectiva aceptan el carácter probabilista introducido por Born e indican que la descripción dada por ψ es completa. Desde esta perspectiva, la función de onda sólo describe un “campo de información” que no refiere a objetos físicos, sino que se toma como una herramienta matemática que permite calcular los resultados posibles de los experimentos. Este tipo de interpretación tuvo como principal representante a Niels Bohr, seguido por Heisenberg, Paul Dirac, y el propio Born.

Por otra parte, una segunda variante de la primera interpretación sería considerar a ψ como un cúmulo, o ensamble, de sistemas similares pertenecientes a un conjunto estadístico, esto es, no se estaría considerando a ψ como un sistema individual. En este

sentido, las descripciones obtenidas a partir de la función de onda también responderían a un carácter probabilístico pero la descripción dada se consideraría incompleta, pues sólo nos estaría proporcionando información parcial del sistema, abriendo la posibilidad de encontrar otros elementos que pudieran completar la información. Una posición como ésta fue defendida por Einstein.

En relación con la completitud de la descripción atribuida a ψ podemos observar la oposición entre ambas variantes de la primera interpretación; alrededor de este tema fue que se suscitaron los famosos debates entre Einstein y Bohr. En la sección 2.3 se destinará un apartado para hablar de ello.

Ahora bien, en una segunda interpretación para la función de onda, ψ , Bunge (1956) distinguió que se puede entender a la función de onda como un campo material asociado a cada sistema microfísico, por lo que $|\psi(x, t)|^2 dx$ representaría una cantidad de materia contenida en un cierto volumen, dx . Esta propuesta fue desarrollada por Schrödinger poco después de concebir su ecuación. Por otro lado, bajo el supuesto de esta segunda interpretación se considera que la función de onda, ψ , también representa una amplitud de probabilidad que define una distribución de posición de un conjunto de sistemas similares.

De acuerdo con lo anterior puede surgir el interés por entender el origen y la naturaleza del indeterminismo y del carácter probabilista atribuidos a los sistemas cuánticos. Para lograr compensar ese interés se puede optar por buscar una postura en la que se indague por las causas y que no caiga en las paradojas que surgen desde la interpretación estándar, buscando obtener una interpretación más completa con el apoyo de la evidencia empírica. O bien, elegir la postura un tanto pesimista que surge de la interpretación de Copenhague en la que se limita a las explicaciones apoyadas de principios que no están garantizados por una evaluación física, como es el caso del principio de complementariedad, en el que se admite que cuestionarse por lo que hay detrás del comportamiento de los sistemas cuánticos carece de sentido.

La última anotación a esta breve sección se refiere al rol que jugó el propio Niels Bohr frente a sus alumnos o discípulos, como lo fue Heisenberg; me parece importante señalarla pues, en cierto sentido, actuó como un factor para la prevalencia y aceptación de la postura que se adopta en la interpretación de Copenhague. Dado el puesto institucional con el que Bohr contó, se le consideró como una figura paterna en la escuela de Copenhague, manteniéndose como una figura de autoridad dedicada a difundir los ideales planteados en

esa interpretación en diversos auditorios; y se convirtió, de esta manera, en un personaje que buscaba la adhesión de los colegas a sus ideales. (Beller, 1996)

Cabe advertir, por lo demás, que a lo largo del capítulo se presentarán las características anteriormente señaladas —comportamiento dual de los componentes mínimos de la materia, indeterminismo y el papel de la observación—, mostrando cómo fue que se desarrollaron desde la postura de la interpretación estándar, sin que esto signifique un compromiso con ella, sino que al retomarla nos permitirá destacar y señalar los elementos fundamentales de la teoría en los que surgieron controversias y debates.

La información para cada uno de los subtemas de este capítulo sigue la siguiente estructura: en un primer momento se expone cada una de las características fundamentales de la teoría y en qué sentido han estimulado los debates con perspectivas filosóficas, posterior a ello se procede a mostrar cómo se han presentado y expuesto esas características en las publicaciones de divulgación que hemos seleccionado; con ello, observaremos si la representación divulgativa desarrolla o hace alusión a los debates que surgen de esas características fundamentales.

2.1

Representación del comportamiento dual de la materia en la física cuántica a través de textos divulgativos ³⁰

Diversas disciplinas se han encargado de estudiar el nacimiento de la física cuántica: la propia ciencia de la física, la Historia, la filosofía de la ciencia, incluso se ha hecho presente en los textos divulgativos sobre mecánica cuántica. En la mayoría de los textos que estudian el comienzo de esta nueva rama de la física, se indica el problema del cuerpo negro y la catástrofe ultravioleta como las preocupaciones que tenían los físicos a finales del siglo XIX y principios del XX; e indican, también, que su resolución es alcanzada por el físico alemán Max Planck alrededor del año 1900, cuya aportación es señalada como el punto de partida de las investigaciones que lograrían construir la mecánica cuántica.

De esta manera, en los estudios realizados alrededor del cuerpo negro, los cuales buscaban comprender la interacción entre radiación y materia, fueron surgiendo las primeras ideas que han sido consideradas como “precuánticas”. En ese momento todavía no se establecía lo que ahora conocemos como mecánica cuántica.

A partir de la solución dada por Max Planck a la pregunta “¿cómo predecir la cantidad de energía emitida por un cuerpo, para cada longitud de onda y cada temperatura?”, emergería otra serie de cuestionamientos relacionados con cómo se debería interpretar el actuar de la naturaleza y qué significado, desde la física, mostraban los nuevos avances. Dichas preguntas significaron cuestionamientos a los supuestos fundamentales en los que estaba construida la física, los cuales también llegaron a generar análisis desde un sentido filosófico por su relación con la epistemología y la ontología.

Con la postulación del cuanto de acción o constante de Planck como elemento necesario para resolver la catástrofe ultravioleta, se estaría aludiendo al carácter discontinuo de la energía, idea que fractura el supuesto de continuidad que prevalecía en la física clásica. Posteriormente, con la resolución de Einstein al efecto fotoeléctrico, se

³⁰ Es importante señalar que cuando nos referimos al comportamiento dual de la materia se habla de los componentes mínimos de la materia, como los objetos cuánticos o partículas cuánticas. La presente anotación es para evitar la posible confusión de referir el término de “materia” al mundo macroscópico.

determinó el comportamiento dual de la luz, situación que también se oponía a la comprensión anterior de la naturaleza de la luz. Cabe señalar que a través de la historia de la física se pueden observar las diversas hipótesis que se han planteado en torno a la comprensión de la naturaleza de la luz: el fenómeno de la luz fue un tema que inquietó a los antiguos filósofos de la naturaleza de la Grecia antigua y que también ha ocupado a los físicos en épocas más actuales. Este recorrido histórico cobra importancia en la historia de la física cuántica, pues con la aportación de Einstein el entendimiento de este fenómeno volvería a cambiar de una manera radical. Debido a ello, la sección inicial de este escrito se dedicará a presentar los cambios de ideas sobre la comprensión del fenómeno de la luz, lo que permitirá advertir que el interés por la naturaleza de la luz está encadenado con los inicios de la historia de la física cuántica. Con respecto a esto, cuando nos adentremos en las exposiciones divulgativas, observaremos si este antecedente ha sido considerado o no como relevante para ser incluido en dichas exposiciones.

Por ahora, regresemos a revisar los avances que se presentaron en los estudios concernientes a los fenómenos en escala de las partículas. Después de la resolución de Einstein al efecto fotoeléctrico, en 1924 el físico francés Louis de Broglie afirmó que el comportamiento dual en las partículas se trataría de una cualidad intrínseca, lo que significa que las partículas se comportan de una manera en la que reflejan características ondulatorias o corpusculares en función del arreglo experimental. Al principio, la propuesta de De Broglie fue tomada con recelo pues no se contaba con evidencia experimental; no obstante, esta concepción tuvo confirmación empírica pocos años después³¹. De esta manera se estaría consolidando la concepción de un comportamiento dual, onda-partícula, tanto de la luz como de la materia; y dicho comportamiento sería valorado como una característica fundamental de la física cuántica.

Esto provocó un cambio sobre la comprensión de los componentes mínimos de la materia y generó debates y análisis desde un sentido filosófico, dado que se buscó dar razón de esa nueva manera de comprender la naturaleza.

Tras haber hecho la anterior aclaración a manera de preámbulo para esta sección, el presente apartado se divide en dos grandes bloques. El primero busca mostrar, de manera general, los cambios que se presentaron en las concepciones sobre la naturaleza de la luz a lo largo de la historia de la física. Tal descripción nos permitirá situarnos en las cuestiones

³¹ En 1927, los físicos Clinton Davisson y Lester Germer comprobaron la naturaleza ondulatoria de los electrones a partir de observar patrones de interferencia.

que preocupaban a los físicos al finalizar el siglo XIX, momento en el que se creía que, con algunos cambios en las teorías ya establecidas, la mecánica de Newton y el electromagnetismo de James Clerk Maxwell, se lograría dar cuenta de ellas. Describiremos en qué consistió la problemática del cuerpo negro y la explicación que dio Einstein al efecto fotoeléctrico en 1905 basado en la aportación de Planck, también observaremos las implicaciones que tuvieron dichas conclusiones. Después de esto, estudiaremos la aportación de Louis De Broglie en 1924 con la proclamación de la naturaleza dual de los electrones, quien también retomaría la contribución de Planck.

El propósito de esta primera presentación descriptiva no es solamente mostrar que cada aportación fue una confirmación de la presencia de la constante de Planck en los fenómenos microfísicos, tanto en el ámbito teórico como en el experimental, sino también se busca destacar cómo dichas aportaciones representaron cuestionamientos a nociones preconcebidas de la física clásica. Esta situación provocó una reflexión filosófica en la ciencia, pues obligaba a una revisión más profunda de los patrones de pensamiento, por decirlo de alguna manera, establecidos a partir de las reglas de la física clásica (Cushing, 2003).

En el segundo bloque nos detendremos a observar cómo se representan y se exponen las ideas precuánticas a un público no familiarizado con la ciencia o, al menos, con la física cuántica. También veremos en qué medida los textos elegidos³² y sus autores reflejan los debates fundamentales de la teoría que aparecieron desde el origen y desarrollo de la mecánica cuántica.

Antecedentes sobre la dualidad onda-partícula de la materia

Cambios en el entendimiento sobre el comportamiento de la luz

En este apartado estudiaremos el comportamiento dual de los componentes mínimos de la materia. Tal comportamiento puede entenderse, *grosso modo*, de la siguiente manera: la materia, en sus componentes últimos, presenta una conducta ondulatoria, como si se tratara de las ondas en el agua y, también, podría presentar un comportamiento corpuscular, como si fuera el movimiento que realizan las canicas o bolas de billar. Sin

³² La lista de los textos está señalada en la INTRODUCCIÓN de esta tesis.

embargo, antes de llegar a esta representación del comportamiento de los componentes mínimos de la materia, es preciso remitirnos a episodios dentro de la historia de la física en los que se analizó y reflexionó sobre el fenómeno de la luz; esto con la intención de mostrar las fases por las que pasó la comprensión de este fenómeno. Observaremos los cambios en el pensamiento e interpretaciones, desde las ideas que surgieron en antiguas civilizaciones hasta los estudios recientes en la física moderna. Este recorrido nos permitirá plantear el comportamiento dual en los objetos cuánticos. Así, contemplar el entendimiento del fenómeno de la luz a través de la historia de la ciencia, y en particular de la historia de la física cuántica, cobra relevancia por las transformaciones que surgieron en la percepción de la naturaleza de la luz gracias al perfeccionamiento en los modos de conocimiento; sin embargo, esto cobra vital importancia cuando surge la cuestión sobre la relación de los fenómenos de radiación —como la luz— con la materia. Volveremos a esto último más adelante; por ahora, basta con realizar un pequeño análisis de los avances que se han presentado en torno al entendimiento del fenómeno de la luz.

La luz ha sido uno de los fenómenos más atractivos y complejos para el hombre. En la ciencia física, por ejemplo, se trata de un fenómeno que nos permite visualizar el mundo de cierta manera a través de los ojos; así mismo, en el mundo del arte se considera vital para la creación plástica y la arquitectura. Debido a su carácter, en un principio incomprendible, surgió la necesidad de conocer su naturaleza y su forma de proceder (Cetto, 2015). En esta sección recurriremos a ambos aspectos: su naturaleza y su comportamiento.

Las ideas que buscaban dar una explicación a este fenómeno se pueden rastrear desde los argumentos de los antiguos griegos; sin embargo, es importante mencionar que los razonamientos planteados durante esta época se entremezclaban con explicaciones para entender la visión. Aquí no profundizaremos en las ideas pertenecientes a este periodo, sólo mencionaremos algunas de las intuiciones que emergieron en antiguos escritos y presentaremos un breve recorrido que muestra cómo ha sido tratado el tema de la luz.

Uno de los primeros pensadores en dedicar reflexiones al fenómeno de la luz fue Empédocles (495-430 a.C.). Él sostenía la hipótesis de que la luz se trataba de una sustancia que fluye a una velocidad finita y es emitida por los cuerpos luminosos. Un poco más tarde, Platón (427-347 a.C.) afirmó que los ojos eran los órganos que emitían luz, así como también los objetos luminosos, por lo que cuando se interceptaban ambos rayos de luz se producía

la visión. Por su parte, Aristóteles (384-322 a.C.) sugería que la luz era uno de los cuatro elementos esenciales que conformarían la materia, y la consideraba una condición necesaria para la visión: la luz se trataba de un fenómeno instantáneo, el cual no se propaga a ninguna velocidad, sino que es un proceso omnipresente que estaba en potencia y se volvía acto.

Más tarde, en el siglo X, el matemático y físico árabe Al-Hasan Ibn a-Haytham, traducido al latín como Alhacén (965-1040, 41), afirmó que la luz se trataba de una entidad física que el ojo podía detectar; además, indicaba que dicho fenómeno tendría que viajar a una velocidad finita (Ibíd, 2015). A través de los estudios en la historia de la óptica se ha asegurado que los textos de Alhacén repercutieron en las ideas que se desarrollarían posteriormente dentro de la tradición renacentista en el ámbito de la ciencia, ya que dichos textos fueron consultados por algunos de los científicos y filósofos notables de esta época, como Kepler, Galileo, Descartes y Huygens (Nader, 2010).

Es, pues, durante la transición entre el Renacimiento y la Edad Moderna cuando se percibió un cambio en el estudio de la naturaleza, pues se comenzaba a presenciar una transformación en la manera de hacer ciencia; en ese momento, y a diferencia de la anterior tradición en donde las explicaciones sobre la naturaleza se basaban en la búsqueda de causas fundadas en hipótesis observacionales, ya se aspiraba a dar una interpretación de la naturaleza a partir de resultados experimentales y herramientas matemáticas. Tomando en cuenta esto, se puede afirmar que los avances se presentaron a través de dos vías complementarias: en la teoría y en la experimentación. Esta manera de proceder dentro de la ciencia también alcanzó al estudio de la óptica, en donde se produjo un auge en la fabricación de instrumentos, como lentes, microscopios y telescopios.

Uno de los científicos de esta época que reflexionó sobre la naturaleza y el comportamiento de la luz fue el físico, astrónomo y matemático holandés Christiaan Huygens (1629-1695). Éste, al hacer observaciones de los satélites de Júpiter, concluyó que la luz tendría que viajar a una cierta velocidad, idea que ya había sido planteada por Alhacén. También afirmó que la luz es un fenómeno ondulatorio que se propaga a través de un medio tenue y altamente elástico. Es en este sentido que en su texto *Traité de la lumière* (1678) se plantea el primer intento de una teoría ondulatoria de la luz. (Ibíd, 2015)

No obstante, la idea de Huygens de considerar la luz como un fenómeno ondulatorio no recibió un apoyo notable por parte de los colegas o la comunidad científica; en esa época

la postura que adoptaría Newton (1642-1727) sería la que obtendría más seguidores, quien señalaba que la luz se trataba de un fenómeno corpuscular³³.

Otra reflexión en torno a la luz originada en el siglo XVII fue la que presentó el filósofo René Descartes (1596-1650). En su texto *La Dioptrique* (1637) el filósofo francés indicaba que la luz era un fenómeno compuesto por partículas o corpúsculos, los cuales deberían viajar a través de un medio denso pues, suponía, no era posible la idea del vacío: creía que todo el espacio estaba lleno de un plenum o éter, por lo que todas las interacciones que se presentaran en este medio estarían intermediadas por los componentes de éste.

La idea de Descartes de considerar que la luz está compuesta de corpúsculos fue seguida por Isaac Newton; no obstante, su postura sobre la existencia del éter no es mostrada de manera clara. Para Newton, la luz era algo distinto al éter, pero interactuaba con él. Al referirse a la ley de la gravitación, se tenía como supuesto que la propagación de la gravedad actúa de manera instantánea, por lo que ya no era necesario apelar a la existencia de un éter como medio. Así, sin la existencia del éter, no había lugar para hablar de la luz como un fenómeno ondulatorio, pues no existiría un medio por el cual podría viajar; en ese sentido, la teoría corpuscular parecía más razonable.

Sin embargo, había otro aspecto que también enriquecía el rechazo de una teoría ondulatoria que, aunque se adoptara una postura a favor, ésta no podía dar cuenta del efecto de polarización. Es por ello que Newton y algunos de sus contemporáneos mantenían un argumento en contra de la naturaleza ondulatoria de la luz (Cushing, 2003). No obstante, había quienes defendían que la luz se trataba de un fenómeno ondulatorio, como lo fue el coetáneo y antagonista de Newton, el científico inglés Robert Hooke (1635-1703), quien sugirió, al igual que Huygens, que la luz era un movimiento vibratorio transmitido a través de un medio.

Como vemos, a finales del siglo XVII surgieron dos teorías que postularon de distinta manera la naturaleza de la luz. Sin embargo, a pesar de los planteamientos dados por Hooke y Huygens, como se ha mencionado líneas atrás, la concepción de Newton sobre la naturaleza corpuscular de la luz fue la que prevaleció a través de un siglo. Esto se debe, en parte, a la popularidad que Newton había ganado a raíz de la ley de gravitación; el hecho de que hubiera pocos adversarios que criticaran sus teorías permitió que en los inicios del

³³ Es importante mencionar que durante esos años la ley de la gravitación comenzaba a ser aceptada con gran éxito, como otra de las grandes aportaciones que Newton ofreció a la ciencia en general, aunque tal aceptación no implicaba su comprensión cabal: para algunos esta teoría resultaba “misteriosa”.

siglo XVIII se sostuviera de manera generalizada la creencia de que la luz estaba compuesta por partículas o corpúsculos.

Con estos antecedentes, a principios del siglo XIX se dieron a conocer experimentos que presentaron la condición ondulatoria de la luz. Uno de los más representativos fue realizado en 1801 por Thomas Young (1773-1829): el reconocido experimento de la doble rendija, en el que se mostraba el fenómeno de interferencia. Años después, en 1818, el físico francés Agustin Fresnel (1788-1827) presentó frente a la Asociación Francesa de Ciencias su teoría sobre la difracción ondulatoria de la luz, la cual poco después sería corroborada experimentalmente. Otro evento que constató el comportamiento ondulatorio fueron las mediciones que se hicieron para establecer su velocidad. Uno de ellos fue realizado por los físicos franceses Bernard Foucault (1818-1868) y Armand-Hippolyte Fizeau (1819-1896), quienes concluyeron que la velocidad de la luz disminuía cuando viajaba a través del agua; se trataba, pues, de una velocidad distinta a la que se percibía en el aire. Con estas pruebas, la teoría ondulatoria de la luz se estaría verificando experimentalmente y, de acuerdo con Cushing (1998), el experimento de Foucault y Fizeau podría considerarse como el que daría la mayor victoria para la teoría ondulatoria.

Posteriormente, en 1845 Michael Faraday (1791-1867) vinculó la luz con los fenómenos eléctricos y magnéticos. Esta relación fue estudiada por James Clark Maxwell (1831-1878) en 1850. Él estableció el formalismo matemático que permitió unificar los fenómenos eléctricos y magnéticos, constituyendo así la rama de la física conocida como electromagnetismo.

Aludir a la contribución de Maxwell en este apartado, en el que se ha hablado de la naturaleza de la luz, cobra importancia por la explicación que este físico inglés ofreció a partir del aparato matemático desarrollado. Con la aportación de Maxwell, la luz se definiría como una onda electromagnética, es decir, como oscilaciones que viajan a través del campo electromagnético. El concepto de “campo” es el que permitiría suprimir la idea de una posible acción a distancia entre las fuerzas y también ratificaría la naturaleza ondulatoria de la luz. Además, con esta contribución se lograba dar una justificación de los colores que componen la luz visible para el ojo humano, incluyendo el espectro que no lo es. En otras palabras: al considerar la luz una onda, la frecuencia de dicha onda será la que determinará el color emitido.

Con esto culminamos nuestro recorrido histórico alrededor de los cambios que se dieron en el entendimiento de la luz. Con el electromagnetismo se terminaría instaurando la naturaleza ondulatoria, condición que parecería definitiva.

Problemas teóricos y experimentales que propiciaron un nuevo entendimiento en la naturaleza microscópica: radiación del cuerpo negro y catástrofe ultravioleta

En líneas anteriores se dijo que con el surgimiento del electromagnetismo, en conjunto con la mecánica newtoniana, se estaría constituyendo la física clásica. Esto fue así porque, con el primero, se permitiría dar razón de los fenómenos conformados por radiaciones electromagnéticas, esto es, electricidad y magnetismo, basándose en un modelo ondulatorio, que también podría entenderse como un modelo de continuidad; y con la mecánica newtoniana se aportarían las explicaciones a los fenómenos en los que se implica la interacción entre objetos materiales, lo que se asemeja a un modelo corpuscular. En este sentido, sería en el campo del electromagnetismo donde descansaría el estudio de la naturaleza de la luz, pues, al final del siglo XIX parecía que la propiedad ondulatoria era la que definía este fenómeno.

El interés de algunos físicos a finales del siglo XIX se enfocaba en la radiación emitida por los objetos. Es importante mencionar que dicha inclinación de la física hacia este fenómeno no respondía solamente a una cuestión académica o intelectual, sino que también surgía de una dificultad en el área industrial: respondía a una cuestión en un sentido pragmático. Cabe señalar que, en ese momento, como resultado de la emergente industria de la iluminación eléctrica, las empresas alemanas de electricidad y calefacción mostraban un interés por la relación entre la radiación electromagnética y los cuerpos que la emiten; buscaban esclarecer la cantidad de radiación electromagnética o energía emitida en función a las distintas longitudes de onda³⁴ (Cassidy, 2004; Kragh, 2007).

En aquella época, los estudios relacionados con la distribución de la energía de las diferentes longitudes de onda se basaban en un modelo de continuidad, y suponían que el intercambio de energía entre el objeto caliente y la radiación emitida se daba de manera

³⁴ La radiación, al ser comprendida como un fenómeno ondulatorio, se podrá describir a partir de su frecuencia y longitud de onda. Las distintas longitudes de onda componen el espectro electromagnético. A una mayor amplitud de la longitud de onda se tendrá menor frecuencia. Aquellas ondas que tienen una longitud de onda amplia las encontraremos en la zona del infrarrojo del espectro, mientras las de una longitud de onda corta estarán en la zona del ultravioleta.

ininterrumpida. Se sabía que entre mayor temperatura tuviera un objeto más energía emitiría, por lo cual se asume que cualquier objeto caliente propaga energía.

En 1893, el físico alemán Wilhem Wien indicó que la curva de la energía emitida por un cuerpo va cambiando en función de la temperatura del cuerpo. En 1896 propuso una ecuación que daba cuenta de la radiación o energía emitida a frecuencias altas, o longitudes de onda cortas. Sin embargo, su resultado no concordaba con lo observado experimentalmente a bajas frecuencias o longitudes de onda amplias. La propuesta de Wien llegaba a resultados que indicaban una emisión de energía infinita. (Kragh, 2007; Papp, 1968)

Más tarde, a mediados de 1900, con la Ley de Rayleigh-Jeans; propuesta por Lord Rayleigh (1842-1919) y James Jeans (1877-1946), se indicaba que, a grandes rasgos, la energía emitida por un cuerpo crece con el cuadrado de la frecuencia. Esta ley dio cuenta de la radiación en longitudes de onda amplias o frecuencias bajas, las cuales caían dentro de la región del infrarrojo. Con esa ley resultaba que la energía emitida por un cuerpo llegaría a ser infinita cuando la frecuencia alcanzaba el rango ultravioleta, esto es, cuando la frecuencia aumentaba. En otros términos, se indicaba que con longitudes de onda cortas o al aumentar la frecuencia, la energía emitida tendía a ser indefinida o infinita, predicción que resultaba inconsistente con los experimentos y por sí misma improbable.

Lo que se observaba en los experimentos era que la cantidad de energía emitida al incrementar la frecuencia llegaba a cierto nivel y después disminuía; esto es, había un límite para la emisión de energía, por lo que ningún cuerpo podría emitir energía infinita.

En ese momento, los físicos se encontraron con el problema de que la curva teórica no coincidía con la curva experimental. A esta inconsistencia e incompatibilidad entre la teoría y la experimentación se le conoció como catástrofe ultravioleta. En la siguiente figura observamos las diferentes curvas obtenidas a partir de la teoría y lo que resulta en los experimentos.

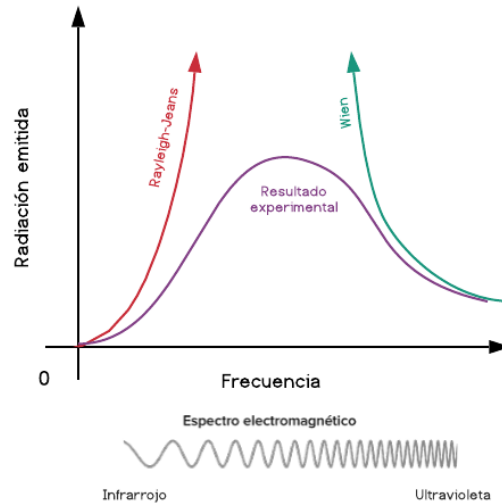


Fig. 1

La catástrofe ultravioleta aparece de la incompatibilidad de las predicciones teóricas con la evidencia experimental

En la física se tenía la creencia de que, con algunas modificaciones a las teorías físicas ya establecidas, esto es, en la mecánica y el electromagnetismo, se daría cuenta de algunos fenómenos que en ese momento carecían de explicaciones satisfactorias. La radiación del cuerpo negro fue uno de esos problemas a los que se enfrentaron los físicos de la época, el cual jugó un papel importante dentro de la historia de la física cuántica y fue considerado, a la par con la catástrofe ultravioleta, como el problema que permitió el surgimiento de esta nueva teoría física a partir de la solución a la que llegó el físico alemán Max Planck (1958-1947).

Un cuerpo negro puede describirse, de manera breve, como aquel objeto ideal que es capaz de absorber toda la radiación que incide sobre él, a la vez que puede emitir radiación de todas las longitudes de onda. La noción “cuerpo negro” fue establecida en 1862 por el físico prusiano Gustav Kirchhoff (1824-1887), quien años atrás había estudiado la radiación emitida por los cuerpos en función de su temperatura.

La pregunta a la que se enfrentó Planck, derivada de la inconsistencia que se presentaba, fue: ¿cómo predecir los datos experimentales, esto es, prever la cantidad de energía para cada longitud de onda y cada temperatura? La resolución a la que llegó el físico alemán significó el inicio de las concepciones que conducirían a la nueva física cuántica.

El razonamiento al que llegó Planck consistió en suponer que la energía se absorbe y se emite en paquetes, a los que llamó cuantos de energía, los cuales resultaban múltiples

de una constante que estableció: la constante de Planck. En este sentido, si se entendía a la energía en función de esos cuantos, se le estaría interpretando como dividida en cantidades discretas, no continua como se suponía, y con ello se implicaría un límite en la energía emitida.

Planck sostuvo que la energía (E) de esos cuantos está vinculada con la frecuencia (ν), a partir de la fórmula: $E=h\nu$. En donde h representa a los cuantos de energía, como lo designó Planck y que después sería nombrada constante de Planck³⁵.

A bajas frecuencias (longitudes de onda amplias) se emitirían muchos paquetes de energía, pero la energía es tan baja que no es relevante. En cambio, a frecuencias mayores (longitudes de onda corta) se requerirá de mayor energía para producir esos paquetes o cuantos de energía, por lo que habrá un momento en el que no habrá energía suficiente y no se podrán emitir esos cuantos.

En un principio, la propuesta de la constante de Planck se consideró solo como una herramienta matemática que permitía predecir la densidad de energía para cada longitud de onda. El argumento inicial de Planck consistió, esencialmente, en un ajuste fenomenológico de las curvas, en el sentido de que la introducción de la constante h fue considerada como un recurso *ad hoc* que permitiría salvar la discordancia entre la teoría y la experiencia. El mismo Planck se refirió al proceso para encontrar la solución como un golpe de suerte (Cushing, 2003). En un primer momento no estaba seguro de que la inclusión del cuanto de energía representara un componente real del mundo físico. Pero, antes de que fuera afirmada tal condición, Planck se ocuparía de buscar un sustrato teórico que permitiera “ampliar su aplicabilidad y dar más riqueza y fertilidad a su aportación” (Cadenas, 2002); en ese sentido, buscaba dotar de significado físico la propuesta establecida. Con este objetivo en mente se acercó a la mecánica estadística de la ley de distribución de Maxwell-Boltzmann³⁶ y la aplicó a la distribución de la energía.

Con respecto a su búsqueda, Planck se refirió a este proceso como “el trabajo más arduo de su vida”, asegurando que: “El mismo día que formulé por primera vez esta nueva ley de distribución, comencé a dedicarme a la tarea de dotarla de un significado físico real, tema que de por sí me llevó a considerar la relación entre entropía y probabilidad y por

³⁵ El valor de la constante de Planck es muy pequeño, por lo que en escalas macroscópicas no representa algún efecto, a diferencia de las escalas microscópicas. Su valor es de $6,626 \times 10^{-34}$ erg/s = 0,00000000000000000000000000000006626 erg/s).

³⁶ La ley de distribución de Maxwell-Boltzmann da cuenta de la distribución de un sistema termodinámico de partículas. Ésta es aplicable a sistemas constituidos por moléculas de gases.

consiguiente a la línea de pensamiento de Boltzmann”³⁷ (En: Kuhn, 1987). Después de la proclamación de Planck sobre la ley de distribución, las posteriores pruebas experimentales se encargaron de confirmar la condición discontinua de la naturaleza microfísica³⁸.

Una idea intrínseca que se puede rastrear en la postulación de Planck es la concepción de discontinuidad en los procesos microfísicos, lo que conduciría a importantes implicaciones filosóficas, de las que el físico alemán fue consciente (Weinert, 2009). Con esto, el antiguo dicho griego “la naturaleza no da saltos”, que se había traducido en el supuesto de continuidad, se desvanecería. Tal supuesto fue seguido por Newton y Leibniz y representaría una característica intrínseca de las funciones de la física clásica en las ecuaciones diferenciales, con las que se suponía regían “toda la evolución de los fenómenos” y determinarían “todo el porvenir” (De Broglie, 1941).

La postura de Planck reflejaba, en primera instancia, una aparente oposición hacia los supuestos de la física clásica dada la naturaleza revolucionaria de su conjetura. Tardó varios años en adaptarse al nuevo enfoque que representaba la introducción del cuanto de acción para la física clásica, pero finalmente aceptó la realidad de los cuantos y la discontinuidad implícita. En su opinión, esos años no fueron en vano porque, en última instancia, la expectativa de nuevas aportaciones que permitieran alinear la resolución de la catástrofe ultravioleta con la tradición de la física clásica, le dejaron la enseñanza del verdadero significado del cuanto de energía y la necesidad de un nuevo enfoque para los fenómenos atómicos (Cushing, 2003).

Una de las aplicaciones de la constante de Planck que más ha tenido difusión, tanto en los libros de texto como en la historia de la ciencia y en la divulgación, ha sido la investigación que realizó Albert Einstein para dar cuenta del efecto fotoeléctrico.

³⁷ Las declaraciones de Planck sobre la inquietud que le causaba la interpretación del significado físico del cuanto de acción con respecto a los supuestos dados en la física clásica fueron manifestados en varios de sus discursos; sin embargo, hay que destacar que esa preocupación se fue atenuando al paso de los años, hasta llegar a aceptar la nueva concepción de la naturaleza microscópica, consentimiento que también declararía por escrito. Ver: Planck, M. (1918) *The Genesis and Present State of Development of the Quantum Theory*; (1932) *Where is Science Going?*; (1950) *Scientific Autobiography and Other Papers*.

³⁸ Las principales pruebas experimentales de la ley de Planck se citan en: Jammer, M. (1966) *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, p. 23.

Reafirmación de la propuesta de Planck, explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico fue descubierto por el físico alemán Heinrich Hertz (1857-1894). Él descubrió que cuando cierta radiación o luz incide sobre ciertas placas de metal aparece una emisión de electricidad o, en otros términos, se despiden electrones. La explicación de las causas de este fenómeno no estaba muy clara hasta que Albert Einstein, en 1905, desarrolló una teoría en la que afirmó que toda radiación está compuesta por fotones, es decir, por elementos discretos que siguen un comportamiento corpuscular. Con la aportación de Einstein es posible imaginar a los fotones como unas pequeñas balas que cuando chocan con los electrones del metal transmiten energía y lo que provoca es que los electrones salgan disparados de la placa metálica. Esta descripción es breve pero suficiente para retroceder en la historia y analizar la problemática que representaba.

Antes de la explicación dada por Einstein, se entendía que había una interacción entre la radiación y la materia, y siguiendo la teoría clásica del electromagnetismo, se suponía que si se aumentaba la frecuencia de la luz radiada al metal, entonces tendría que haber un aumento de energía en los electrones expulsados del metal: se esperaba que, al aumentar la frecuencia de la luz, hubiera un aumento en la velocidad de los electrones que se desprendían. Pero no sucedía esto: los electrones salían a la misma velocidad y lo único que se afectaba era la cantidad de electrones que salían disparados.

Después de las conclusiones a partir de lo que se observaba experimentalmente en torno al efecto fotoeléctrico, se generaron varias dificultades en la teoría. Presentaremos dichas dificultades a través de la exposición dada por George Gamow en su texto *Biografía de la física*; su forma de exposición es clara y resumida.

1. Para una cierta frecuencia de luz incidente, la energía de los electrones emitidos no cambia, pero su número aumenta en proporción directa a la intensidad de la luz.
2. Cuando la frecuencia de la luz incidente cambia (aumenta) no se emiten electrones hasta que se alcanza cierto umbral de frecuencia (que depende del metal). Para frecuencias más altas, la energía de los electrones aumenta en proporción directa a la diferencia entre frecuencia empleada y frecuencias umbral (2010, p. 304).

Como se mencionó líneas atrás, quien llegó a una respuesta y explicación de este fenómeno fue Einstein, quien se basó en la aportación de Planck del cuanto de energía. Su propuesta se hizo pública en su artículo titulado “Un punto de vista heurístico sobre la producción y transformación de la luz” (1906) en la revista *Annalen der Physik*. A grandes

rasgos, lo que él propone en el artículo es que la luz no se trata de una onda continua, sino que está conformada por cuantos de luz, que posteriormente fueron llamados fotones³⁹.

Einstein supuso que la cantidad de energía (E) del fotón está relacionada con su frecuencia (ν) mediante la ecuación: $E = h\nu$. Cuando se emite un electrón desde la superficie del metal, su energía cinética es: $K = h\nu - w$, donde $h\nu$ es la energía del fotón incidente absorbido y w es el trabajo necesario para sacar al electrón del metal (Eisberg & Resnick, 2013). De la misma manera que la propuesta de Planck, Einstein combinó y relacionó propiedades ondulatorias, como la frecuencia (ν) con la energía (E). (Lovett Cline, 1973, p. 97)

Cabe señalar que la solución que había desarrollado Planck sólo llegaba a “cuantizar” la emisión y absorción de energía, pues él dudaba en extender el concepto de cuantización a la radiación electromagnética debido a la aceptación que tenía la teoría electrodinámica de Maxwell, en la que se postulaba que un campo electromagnético sería capaz de conducir a la energía en un modelo de continuidad. No obstante, con la aportación de Einstein, “la noción primitiva de Planck de los paquetes de energía cobró una forma más definida” (Gamow, 2010, p. 303), y se comenzó a cuantizar el campo electromagnético en el que los elementos constitutivos serían los fotones. No obstante, es necesario apuntar que el concepto de luz como constituida por partículas no se debe considerar como un reemplazo de la idea de la luz como onda, sino que, bajo circunstancias usuales, un haz de luz estaría compuesto por una gran cantidad de fotones y su comportamiento obedecería al fenómeno ondulatorio. En este sentido, se trata de una situación aún más extraña frente a las teorías de la física clásica y sus ideales descriptivos, pues se estaría afirmando el carácter dual en el comportamiento de este tipo de fenómenos, es decir: una conducta como la de una onda y como la de una partícula.

Dentro de la historia de la física cuántica, varios autores han afirmado que Einstein, además de dar la explicación adecuada para el efecto fotoeléctrico, fue el primero en tomar en serio las implicaciones físicas que acarrearía la postulación del cuanto de energía y la constante de Planck. Einstein no consideró la aportación de Planck simplemente como un truco matemático, sino que planteó públicamente la necesidad de acoger esta nueva teoría y su nuevo elemento como una limitante para la energía que permitiría resolver la catástrofe ultravioleta y el efecto fotoeléctrico, lo que significaría una restricción para la

³⁹ Término acuñado en 1926 por el físico estadounidense Gilbert N. Lewis.

idea de continuidad en la física clásica (Kuhn, 1987; Lovett Cline, 1973; Sánchez Ron, 2005)⁴⁰:

[Antes de Planck] era virtualmente imposible darse cuenta de que la raíz de los inconvenientes estaba en el supuesto de la continuidad en la energía. Las mediciones con el cuerpo negro fueron el primer testimonio reconocible de que el mencionado supuesto pudiera ser erróneo [...] Incluso la idea de la continuidad en la naturaleza, y así de la energía ininterrumpida, ni siquiera parecía ser un supuesto. Se daba aquello por descontado [...] los físicos 'supusieron' que la energía era continua. Que [los físicos] fueran incapaces de resolver el problema [de la catástrofe ultravioleta] con semejante supuesto no hizo que lo pusieran en tela de juicio. (Lovett Cline, 1973, p. 77)

A manera de resumen, observamos que la resolución que dio Einstein al efecto fotoeléctrico implicó que en la luz también se presentaba la característica de discontinuidad. Se advierte, tal y como hemos dicho, que el entendimiento de la naturaleza de la luz sufrió varios cambios. Con la conclusión de Einstein se rompía con la tradición: anteriormente se había considerado la luz o radiación como un fenómeno ondulatorio; el discernimiento de la naturaleza de la luz no solamente estaría regresando a un modelo corpuscular, sino que se refería a un comportamiento dual, el de onda y partícula.

Cabe señalar que la propuesta de Einstein sobre la consideración de partículas de luz no fue acogida rápidamente por sus colegas que seguían la tradición de la física clásica e interpretaban la luz como un fenómeno continuo; además, en ese momento Einstein no tenía el reconocimiento de la comunidad científica ni mucho menos era reconocido públicamente, así que la aceptación generalizada de esta postura se dio hasta 1922, con la demostración experimental de Compton⁴¹ y el desarrollo de las hipótesis que conformarían la mecánica cuántica. De esta manera, tanto la aportación de Planck como la de Einstein se han estimado como trabajos precuánticos, pero no por ello se les resta importancia, pues jugaron un papel muy importante para la fundamentación de la teoría y la nueva percepción que se generaría para lograr un entendimiento de los fenómenos a escala atómica.

⁴⁰ En el análisis que realiza Thomas Kuhn sobre la teoría del cuerpo negro y la idea de discontinuidad, afirma que el texto de Einstein, en el que expresa públicamente la restricción que representó la postulación de la constante de Planck sobre la idea de continuidad en la física clásica, se puede considerar como el documento que representa el nacimiento de la teoría cuántica, refiriéndose al artículo de 1905 con el título original: "Über emem die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtsponk" y traducido como "Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz", publicado en *Annalen der Physik*.

⁴¹ El efecto Compton trata de un fenómeno que ocurre cuando un fotón choca con un electrón y a causa de ello pierde energía y disminuye su frecuencia o, en otros términos, aumenta su longitud de onda. Este efecto fue estudiado en 1923 por el físico estadounidense Arthur Compton y resultó ser la demostración sobre la naturaleza cuántica de la luz después de las investigaciones realizadas por Planck y Einstein.

En un primer momento, las implicaciones que traía la constante de Planck, como un límite para la naturaleza de la radiación, se circunscribían a la idea de discontinuidad en la naturaleza; después alcanzaron a cuestionar las nociones de causalidad y determinismo en los fenómenos microscópicos, situación que atrajo discusiones filosóficas para la teoría cuántica, las cuales se abordaremos en secciones siguientes⁴². Una declaración manifestada por James Jeans en 1930 nos permite percatarnos de ello:

Einstein demostró, en el año 1917, que la teoría fundada por Planck, al menos en un primer examen, parecía provocar consecuencias más revolucionarias que la mera discontinuidad. Parecía destronar la ley de la causalidad de la posición que hasta entonces se había mantenido como guía del curso del mundo natural. (Jeans, 1930)

Comportamiento dual de los componentes mínimos de la materia, aportación de Louis de Broglie

Otro uso que se le dio a la constante de Planck y que permitió que se consolidara fue la explicación que el físico francés Louis De Broglie (1892-1987) aportó para describir la estructura atómica, su explicación daba sentido al sistema atómico de orbitas que había propuesto Bohr. La teoría que desarrolló De Broglie se basó en las contribuciones de Planck y Einstein, su propuesta significó que la representación del átomo se hace menos semejante a un sistema planetario al insertar el movimiento ondulatorio a las órbitas de los electrones. En este sentido, el carácter ondulatorio en conjunto con el atributo corpuscular integraría una característica general para cada electrón; con ello se estaría estableciendo el carácter dual en la materia. A raíz de esta aportación, De Broglie recibió el Premio Nobel de Física en 1929, después de que sus ideas obtuvieron el respaldo experimental gracias a los trabajos de los físicos estadounidenses Clinton Davisson y Lester Gerner, quienes observaron propiedades ondulatorias en los electrones, ya que en el momento en el que De Broglie afirmó esta propiedad sólo fue considerada como una hipótesis carente de realidad física.

Fue en la tesis doctoral (1924) donde De Broglie presentó de manera formal el carácter dual en el comportamiento de los componentes mínimos de la materia. De Broglie asoció la energía (E) con la frecuencia de la onda asociada a su movimiento (ν), esto por medio de la ecuación $E = h\nu$; y el impulso (p) del electrón se relacionaría con la longitud de onda (λ), con la ecuación $p = h/\lambda$, así también, se podría determinar la longitud de

⁴² La discusión entre causalidad y determinismo/indeterminismo se encontrará en apartado 2.2 - Representación de la característica de indeterminismo en la física cuántica a través de los textos divulgativos”.

onda (λ) de cualquier objeto al conocer su impulso: $\lambda = h/p$. Con esto, los conceptos corpusculares de energía (E) e impulso (p) se estarían vinculando con los conceptos ondulatorios de frecuencia (ν) y longitud de onda (λ) a través de la constante de Planck, h (Eisberg & Resnick, 2013).

Teniendo presente que la constante de Planck es un número muy pequeño, entre mayor sea el valor del impulso la longitud de onda será más pequeña. En este sentido, es muy importante señalar que la longitud de onda asociada a los objetos macroscópicos –los objetos con los que convivimos–, es mínima, por lo que su aspecto ondulatorio es imperceptible.

Alcances y reflexiones de las primeras concepciones cuánticas

Con lo dicho hasta aquí se puede observar que el problema del cuerpo negro o la catástrofe ultravioleta fueron los temas que impulsaron la investigación sobre la interacción entre materia y radiación. Se pensaba que, con algunas modificaciones a la física clásica, constituida por la mecánica newtoniana y el electromagnetismo de Maxwell, se podrían resolver algunas cuestiones que en ese momento todavía no contaban con una explicación favorable. La problemática residía, a grandes rasgos, en que las teorías ya establecidas sobre la radiación (la de Rayleigh y la de Wien) no daban cuenta de lo que se observaba experimentalmente.

Según se ha descrito, fue Max Planck quien llegó a una solución a partir de postular el cuanto de energía, que posteriormente se conoció como la constante de Planck, h . Con la introducción de esta constante se implicaba, en primer plano, que la energía debería considerarse como un proceso discontinuo, idea contraria a los supuestos establecidos en la física clásica que seguían un modelo de continuidad. Con dicha constante se estaría vinculando la energía con la frecuencia; la primera se refiere a una magnitud dinámica y la segunda a una geométrica, es decir, se trata de dos tipos de magnitudes que en la física clásica podrían seguirse por separado. Además, por tratarse de una constante, se estaría estableciendo un límite mínimo en la energía transferible (Cadenas, 2002).

También recordemos que la resolución de Planck en un principio se consideró una conclusión en un sentido heurístico, pues era capaz de resolver el problema del cuerpo negro, pero no tenía un fundamento teórico en cual basarse. Con respecto a ello, Planck se

dedicó a buscar su base teórica, la cual encontró en la termodinámica estadística de Boltzmann. Asimismo, cabe señalar que la postura de Planck ante tal resolución fue, por decirlo de alguna manera, de recelo, pues consideraba su propia aportación una hipótesis *ad hoc* a la que se le debería estudiar más y asociarla en un momento dado con los supuestos de la física clásica.

No obstante, con las posteriores aplicaciones del cuanto de energía a otras explicaciones, como en el efecto fotoeléctrico, el sentido heurístico con el que se le había vinculado se comenzó a desvanecer. A pesar de que las nuevas teorías lograban dar cuenta de tales fenómenos, la respuesta positiva de la comunidad científica no se dio de manera instantánea, sino gradualmente. Por ello, los resultados experimentales jugaron un papel muy importante en la influencia y aceptación de la nueva visión de la naturaleza atómica.

Los primeros obstáculos que se hicieron visibles para acoger el cuanto de energía fueron, como ya se dijo anteriormente, el carácter discontinuo de la energía, lo que llevaría a revisar los fundamentos teóricos de la física clásica, y después se observaría que también implicaría un comportamiento dual para la luz y las partículas. En relación con el entendimiento de la naturaleza de la luz observamos al inicio del escrito que ha sido un tema sumamente explorado a lo largo de la historia de la física, y en el que se ha llegado a conclusiones opuestas en distintos periodos; en algunas ocasiones se suponía que el fenómeno seguía un modelo corpuscular y en otras se entendía como un modelo ondulatorio. Al considerar la constante de Planck para dar cuenta del efecto fotoeléctrico, Einstein llegaba a la conclusión de que los fenómenos luminosos tenían un comportamiento dual: onda y partícula. Más tarde, Louis De Broglie estaría afirmando tal comportamiento en las estructuras mínimas de la materia, como los electrones. Esta teoría también tuvo que esperar para ser aceptada completamente hasta ser verificada experimentalmente.

Una vez visto lo anterior, es preciso aclarar que el comportamiento dual se trata de una característica que se presenta en la escala microscópica, que a nuestra escala no es posible que se perciba y que además, resulta ser una idea que va en contra de la intuición.

El alcance de la postulación del cuanto de energía no solamente se restringe al proceso de transición en la comunidad científica para aceptar un nuevo elemento que conllevaba un límite en el estudio de la naturaleza; también en un sentido ontológico se tendría que considerar ese componente como propio de la naturaleza. Este cambio motivó una pregunta esencial en la historia de la física: ¿qué significado físico se le debería otorgar

a la constante de Planck?, o, en otros términos, ¿qué nos dice sobre la naturaleza la constante de Planck?

Como vemos, lo que se ha presentado aquí solamente corresponde a las ideas germinales que permitieron el desarrollo de la teoría y que, como se ha dicho anteriormente, se han catalogado como teorías precuánticas, pues en ese momento todavía no se desarrollaba el formalismo que conformaría la nueva teoría física.

A lo largo del presente estudio observaremos que la historia de la física cuántica y los debates sobre los fundamentos de esta teoría no se restringen a tratar de entender el carácter discontinuo o el comportamiento dual, pues las discusiones más grandes surgieron después con las aportaciones de Schrödinger, Heisenberg, Bohr, Einstein, entre otros. Se razonó sobre las relaciones de indeterminación; Bohr reflexionaba sobre la complementariedad; se discutía si la teoría cumplía con el carácter de ser completa o no, y también qué interpretación física se debería acoger ante el formalismo que se presentaba en la teoría.

El inicio de la física cuántica representado en los textos divulgativos

Concepción de discontinuidad a partir de la introducción de la constante de Planck

Hasta este momento hemos presentado las primeras implicaciones que aparecieron con el surgimiento de la constante de Planck; también comentamos cómo este elemento desempeñó un papel importante para la explicación del efecto fotoeléctrico y, posteriormente, determinó el comportamiento dual tanto en la luz como en los componentes mínimos de la materia. Asimismo, observamos las inquietudes que estos avances provocaron en la comunidad de físicos, pues se trató de un nuevo componente que cuestionaba los fundamentos teóricos establecidos por la tradición clásica. En la presente sección nos introduciremos en los textos divulgativos seleccionados para observar cómo los autores representan los temas planteados en las páginas anteriores y en qué medida reflejan las primeras preocupaciones que emergieron alrededor de los fundamentos de la física.

Los primeros textos divulgativos que intentan introducir a la física cuántica fueron publicados pocos años después de que en la teoría cuántica se presentaran las formulaciones matemáticas para dar cuenta del comportamiento del mundo microscópico. En 1924, Louis De Broglie había propuesto su teoría de ondas materiales. Al año siguiente, Heisenberg presentó su mecánica matricial y Schrödinger propuso la mecánica ondulatoria; ambas propuestas resultaron ser aparatos matemáticos equivalentes. Además, en 1927 se desarrolló la quinta Conferencia de Solvay, una reunión que cobró importancia, tanto para la historia de la física como para la filosofía de la ciencia, pues en ella tuvieron lugar debates alrededor de las nuevas propuestas. Entre los asistentes a este evento estuvieron varios de los físicos que habían participado en el desarrollo de la nueva teoría de la física. Después de estos acontecimientos de gran importancia para la formación de la mecánica cuántica, comenzaron a aparecer las publicaciones divulgativas que pretendían introducir la nueva teoría a un público más amplio.

La manera de exposición en esta sección obedecerá al orden cronológico en el que aparecieron los textos, lo que nos permitirá advertir, de cierta manera, los cambios que se presentan en el discurso, diferencias que van en función tanto del estilo de cada autor, así como de la propia historia de la física, es decir, de los avances teóricos y experimentales que se hicieron presentes en la física.

La naturaleza del mundo físico (1928) de Arthur Eddington

Uno de los primeros textos de divulgación que trataron la teoría cuántica fue *La Naturaleza del Mundo Físico*, publicado en 1928 por el físico inglés Arthur Eddington. Dicha publicación fue una recopilación de sus conferencias realizadas en la Universidad de Edimburgo durante 1926 y 1927; el público al que fue dirigido podría considerarse un público “amplio” por no pertenecer al grupo de científicos que trabajaron directamente con la teoría. Además, antes de iniciar con la exposición, Eddington precisa que la “lectura se puede realizar con facilidad”, ya que está escrita con el “estilo de una conversación [...] renunciando a las fórmulas matemáticas, con la intención de mostrar explicaciones como si se encontrase frente a alguien que lo interrogara”. En *La Naturaleza del Mundo Físico* se expresa la novedad que representó la nueva teoría y la perplejidad que ocasionó a la comunidad de físicos.

Las conferencias o capítulos en donde aparecen algunos aspectos de la nueva teoría cuántica son tres: “El derrumbe de la física clásica”, “La teoría de los cuantos” y “La nueva teoría de los cuantos”. En el primero se presenta el alcance que tuvieron las “dos grandes teorías modernas”, refiriéndose a la teoría de la relatividad de Einstein y a la teoría de los cuantos que, de acuerdo con el autor, implicaron “un apoderamiento de nuevos conceptos que no podían preverse en el marco de la física clásica”, por lo que se presentaron “cambios en la manera de concebir el mundo”. No obstante, en este primer capítulo no profundiza en la descripción de las teorías, pues su objetivo radica en mostrar la importancia que tuvieron ambas teorías dentro de la ciencia, las cuales caracteriza como revolucionarias, además de exponer el nuevo significado del mundo que estas teorías reflejaban. Es hasta la sección titulada “La teoría de los cuantos” en donde presenta la constante de Planck, h , la cual la llama el “átomo o cuanto de acción”, y a partir de ello su exposición sigue un hilo conductor en función de la historia de la teoría. Cabe señalar que en la exposición no hace mención de los protagonistas involucrados, como lo fue Planck, sino que su presentación sigue una explicación basada en ejemplos de la que consiste la constante h .

Eddington comienza con una especie de anécdota acerca del estado en el que se encontraba el ambiente entre los físicos en aquella época —recordemos que el texto es del año 1927— y refiere que en las reuniones entre físicos se dejaba ver un “estado desesperante de ignorancia” con respecto a lo que “oculta” la naturaleza. Tal sensación se debía a que “en las ideas fundamentales de la física moderna hay algo radicalmente equivocado, y a pesar de los esfuerzos no encontramos la solución, [para la causa que es] una pequeña cosa llamada h ” (Eddington, 1938, p. 211). Apunta que esta constante se refiere a la acción a nivel atómico, un nivel incompatible con la “representación actual del mundo”, por lo que “necesita alterar esa representación e introducir modificaciones radicales en las concepciones fundamentales sobre las cuales se basa el esquema de la física”. Señala que a pesar de que h sea medible, por medio de la multiplicación de la energía por el tiempo (acción), sigue resultando extraño, pues en la “vida práctica no se ve la necesidad de multiplicar energía por el tiempo”.

Para ejemplificar en dónde actúa el átomo de acción, Eddington menciona que se tiene que “buscar una forma de energía que tenga un periodo definido de tiempo asociado con ella como, por ejemplo, un tren de ondas luminosas las cuales arrastran con ellas una unidad de tiempo, v.g. el periodo de su vibración” (ibíd., 1938, p. 215). Para dar cuenta de la división de energía, se tendría que admitir que ésta se absorbe y se emite de manera

discontinua, situación que corresponde a lo que “precisamente ocurre”, pero que “choca tanto con nuestras ideas preconcebidas como con la reconstitución de la luz”.

En ese mismo capítulo Eddington se dedica a describir en qué consiste el efecto fotoeléctrico y muestra cómo en este fenómeno hay una relación entre materia y radiación; además explica cómo es que el cuanto de acción se hace presente para otorgar una explicación de este fenómeno. Al finalizar tal exposición, deja claro que en este actuar de la naturaleza se adhiere una ley que no debe ser negada:

Cuando la luz brilla sobre películas metálicas de sodio, potasio, rubidio, etcétera, la película descarga electrones que escapan a gran velocidad [...] sin lugar a duda, es la luz incidente la que provee la energía de esas explosiones, más una ley notable gobierna este fenómeno. En primer lugar, la velocidad de los electrones no aumenta aun cuando aumente la intensidad de la luz. La concentración de la luz produce más explosiones, pero no explosiones más poderosas. En segundo lugar, la velocidad de los electrones aumenta cuando se emplea luz azul; es decir, luz con un período más corto [...] Es este un fenómeno característico de los cuantos. Cada electrón despedido fuera del metal ha tomado exactamente un cuanto a la luz incidente. Dado que la regla h asocia la energía más grande al período más corto, cuanto más azulada es la luz más intensa es la energía [...] Si poseemos algún instinto capaz de reconocer una ley fundamental de la Naturaleza cuando está frente a ella, ese instinto nos dice que la acción recíproca entre la radiación y la materia, resolviéndose en cuantos individuales, es algo que está en la raíz misma de la estructura del mundo y no un detalle fortuito del mecanismo del átomo”. (Eddington, 1938, pp. 220-221).

Hasta aquí, la exposición de Eddington se enfoca en mostrar las dificultades que se presentarían al aceptar el cuanto de acción, h , pues una de las implicaciones que se derivaron de éste era aceptar un comportamiento de la naturaleza distinto al que se había entendido hasta ese momento con la física clásica.

El esquema expositivo que presenta directamente a la constante de Planck, h , no da un contexto ni antecedentes de dónde surgió, esta característica podría representar una dificultad en el entendimiento de los lectores del texto divulgativo, pues no expone bajo qué problemática surgió la postulación de h . Es importante destacar que al presentar un contexto al lector le permitiría crear su propio marco comparativo respecto a lo que definía a partir de las teorías clásicas y lo que se lograba con la introducción de h .

La exposición de la teoría cuántica continúa en el capítulo décimo, titulado “La nueva teoría de los cuantos”. Aquí Eddington se detiene a exponer el conflicto que apareció en relación con la comprensión de la naturaleza dual de la luz y de la materia. De acuerdo con el físico británico, es en el problema de la propagación de la luz donde se agudiza el conflicto entre la teoría de los cuantos y la teoría clásica. Procede a describir a la luz:

Una entidad que se propaga siguiendo un movimiento ondulatorio [...] que también exhibe propiedades bien conocidas de difracción e interferencia. Al mismo tiempo, es una entidad con propiedades corpusculares parecidas a las de un proyectil [...] Resulta difícil describir semejante entidad como una onda o una partícula; si adoptamos una componenda la denominaremos “ondícula”. (Eddington, 1938, p. 235)

Después de ello indica que “recientemente” se había demostrado la naturaleza corpuscular de la luz y que probablemente habría experimentos que revelarían el aspecto ondulatorio de la naturaleza de un electrón. Eddington hace una referencia a la aportación de Louis De Broglie, quien en ese momento ya había indicado “cómo se deberían calcular las longitudes de las ondas (si es que existen) asociadas a un electrón, el cual considera una ondícula”. Al leer las palabras de Eddington, nos podemos dar cuenta del titubeo que existía en la comunidad de físicos, o al menos para este físico británico, sobre la idea de que los componentes mínimos de la materia también tuvieran un comportamiento dual como lo tenían los fenómenos de la luz, mismos que habían sido comprobados alrededor de esos años. No obstante, indica que en ese momento ya se habían obtenido algunos resultados experimentales que comprobarían esa predicción; a pesar de ello, Eddington no se atreve a afirmar tal naturaleza, pues no considera esos experimentos definitivos, sólo indica: “quizá estamos ahora enfrentados a fenómenos similares que desplazarán todas las teorías puramente corpusculares de la materia”.

Con lo expuesto en estos párrafos observamos que el interés de la presentación que hace Eddington está inclinado a mostrar lo que provocó en la comunidad de físicos la aceptación del cuanto de acción, h , que para él representa una condición limitante para los fenómenos en la escala atómica, situación que dejaba a los físicos con la sensación de extrañeza, pero a la vez con una nueva percepción de los fundamentos de la naturaleza. Esta misma condición había sido presentada al exponer el carácter dual de la luz y de la materia, el cual, en esos años, ya había sido comprobado experimentalmente, pero estaba en proceso de aceptación. En este sentido, la exposición de Eddington no descansa en dar una descripción detallada de cómo fueron surgiendo los estudios y las conclusiones que desembocarían en la física cuántica, sino que presenta el desconcierto que se vivió en aquellos momentos derivado de los nuevos resultados que surgían de la aplicación del cuanto de acción en la explicación de distintos fenómenos atómicos, específicamente del carácter dual. Sin embargo, no hace mención de la división que se presentaría con la idea de continuidad derivada de la postulación de h . Considerando lo anterior, es notable su

preocupación por las cuestiones que surgieron en el sentido filosófico, sin ignorar los resultados experimentales de la época.

El Universo misterioso (1930) de James Jeans

Otro texto divulgativo que se publicó por aquellos años es *El Universo misterioso* (1930) del físico inglés James Jeans. En él aparecen dos capítulos que nos permitirán rastrear la exposición sobre los inicios de la física cuántica: “El nuevo mundo de la física moderna” y “Materia y radiación”.

Dentro del capítulo “El nuevo mundo de la física moderna”, James Jeans comienza a describir cómo fueron los primeros intentos de la humanidad para obtener conocimiento. Su recorrido comienza desde las primeras tentativas del hombre para dar una explicación del comportamiento de la naturaleza. Sugiere que, en un primer momento, los fenómenos simples, como la lluvia, provocaban asombro en el hombre, pero al querer dar cuenta de ellos los relacionaban con los “caprichos y pasiones de los dioses”; tiempo después, gracias a la observación y a los estudios, se hizo “emerger el principio de causalidad”, y con el tiempo el hombre aprendería a dominar a la naturaleza, en el sentido de provocar los efectos deseados.

Dice el autor: “el establecimiento definitivo de esta ley [de causalidad], como principio rector en la naturaleza, fue en el siglo XVII, con Galileo y Newton”, etapa en la que este último estaría afirmando que “los fenómenos de la naturaleza podrían ser deducidos por una misma clase de razonamiento a partir de principios mecánicos”. Al asumir lo anterior se estaría interpretando que el universo funcionaba como si fuera una máquina, idea que estuvo presente hasta la segunda mitad del siglo XIX. Se trataría de una maquinaria compuesta por “una gran multitud de pequeñas esferas lisas, más duras que el acero, flotando alrededor como una lluvia de balas en un campo de batalla”. Con esto en mente, Jeans señala que las explicaciones de los fenómenos se daban más o menos en estos términos. Sin embargo, cuando se intentó explicar el fenómeno de la luz siguiendo este mismo esquema no se obtuvo gran éxito, aunque tal dificultad no eliminaría del todo la creencia de que el universo debe, en última instancia, admitir una interpretación meramente mecanicista. En este sentido, para llegar a una explicación completa sobre la luz sólo se necesitaría un mayor esfuerzo.

Posteriormente, James Jeans introduce la intervención del físico alemán Max Planck, presentándolo como el “físico que buscaba dar una explicación a ciertos fenómenos de radiación”, los cuales, en ese momento se habían convertido en un desafío para la ciencia física. Jeans indica que el físico alemán propuso una explicación que “parecía imposible conectarla con cualquier línea de pensamiento mecánico”, lo que le provocaría “críticas, ataques e incluso la ridiculización”. A pesar de ello, tal aportación se convirtió en la “teoría cuántica [...] uno de los grandes principios de la física moderna”.

Dicho esto, Jeans prosigue con las implicaciones que se derivaron de la introducción del cuanto de energía propuesto por Planck:

En su forma más temprana, la teoría de Planck difícilmente fue más allá de la sugerencia de que el curso de la naturaleza procedía por pequeños saltos y sacudidas, como las manecillas de un reloj. A pesar de que el reloj no avanza de forma continua, en su naturaleza es puramente mecánico y sigue la ley de la causalidad. (Jeans, 1930, p. 17)

El autor señala que fue años después, gracias a Einstein, cuando se llegó a la conclusión de que la aportación de Planck tendría consecuencias más profundas, las cuales iban más allá de la discontinuidad. Tales consecuencias “destronarían” la ley de la causalidad, considerada como “la guía del curso del mundo natural”.⁴³ Jeans indica, también, que la discusión respecto a “la posible supresión de la ley de la causalidad y del determinismo” es un resultado “relativamente reciente en la historia de la teoría cuántica”. Es en este momento cuando comienza a describir los inicios de la teoría y cómo se buscó la explicación de ciertos fenómenos de la radiación.

El punto de inicio que James Jeans elige para comenzar el relato es el siglo XVII, con la concepción que tuvo Newton sobre el fenómeno de la luz, basado en un modelo corpuscular, como si se tratase de “una corriente de partículas lanzadas a partir de una fuente luminosa, como desde un arma”; no obstante, esta concepción se enfrentaba a ciertas dificultades, como la interferencia y la difracción. Después de esta exposición, el autor presenta, brevemente, el cambio de visión cuando se consideró la luz un fenómeno ondulatorio y la dificultad con la que se enfrentó este modelo. James lo expone:

[...] el reemplazo trajo consigo sus propias dificultades. Cuando la luz del sol pasa a través de un prisma se divide en un "espectro" de colores como el arco iris: rojo, naranja, amarillo, verde, azul, añil y violeta.

⁴³ La presentación que hace James Jeans sobre el efecto que tuvo la aportación de Max Planck hacia la Ley de la Causalidad se expone en el apartado 2.2 – “Representación de la característica de Indeterminismo en la física cuántica a través de los textos divulgativos” de esta tesis.

Si la luz consistía en ondas como las olas del mar, se puede demostrar que la luz solar analizada debe encontrarse en el extremo violeta del espectro. No solo eso, sino que las ondas en el extremo violeta tienen una capacidad ilimitada para absorber energía y, ya que tienen la boca abierta permanentemente, toda la energía del universo pasaría rápidamente en la forma de radiación violeta o ultravioleta. (Jeans, 1930, p. 32)

Después de presentar lo anterior como inconveniente de considerar a la luz como fenómeno ondulatorio, Jeans señala que la teoría cuántica intervino de manera satisfactoria y logró dar una solución. Ésta radicaría en considerar “los haces de luz como divididos en unidades discretas, llamados cuantos de luz o fotones [...] como cuando una lluvia de la ducha puede ser dividida en gotas de agua, o como una lluvia de balas de plomo, o como un gas dividido en moléculas” (Ibid., p. 34), pero también se debería tomar en cuenta que la luz no perdería su carácter ondulatorio. Es decir, Jeans alude al carácter ondulatorio de la luz y puntualiza que se trata de una característica que ya había sido comprobada a través de los experimentos de Young y Fresnel. Posterior a ello, presenta el carácter dual en las partículas mínimas de la materia, como los electrones. Señala que “recientemente”, alrededor de 1930, “se [había] descubierto una dualidad en la naturaleza de los electrones y los protones similar a lo que ya se conocía en la naturaleza de la radiación; en los que parecen ser partículas y ondas al mismo tiempo” (Ibid., p. 35)⁴⁴. A pesar de que menciona que tienen un comportamiento de partículas y ondas “al mismo tiempo” señala que es en distintos experimentos donde difieren los comportamientos. En este sentido, es relevante mencionar que cuando se señala que el comportamiento dual se presenta en un mismo momento o “al mismo tiempo” podría causar interpretaciones erróneas, pues esto no sucede así, sino que cada uno de las manifestaciones se presenta en función del experimento. Finalmente, Jeans señala que en su texto que tanto Louis de Broglie como Schrödinger trataron de interpretar el carácter ondulatorio de la materia como si siguieran “el comportamiento de un grupo de ondas”.

Al haber presentado los cambios que se observaron en el entendimiento de la luz y la conclusión dada sobre el carácter dual de la materia, Jeans concluye que debido a ello se provocó una evolución en el pensamiento y reflexiona sobre la división que se presentó en la física en las explicaciones dadas a los fenómenos de distintas escalas. Por un lado, indica que los fenómenos que ocurren en la escala macroscópica son hechos que nos son

⁴⁴ Es importante señalar que en diversos discursos de divulgación se presenta a la dualidad onda partícula como un fenómeno que puede darse simultáneamente, sin embargo, el carácter ondulatorio o corpuscular se manifestará en función del arreglo experimental, es decir, ambas propiedades no se exhiben al mismo tiempo.

familiares, pero al contemplar la escala atómica las particularidades que aparecen van en contra de la intuición. Sobre esto, dice el autor:

Siempre y cuando la ciencia se ocupa solamente de fenómenos a gran escala, puede obtenerse una imagen general que nos parece adecuada. Pero cuando abraza más de cerca la naturaleza, pasa al estudio de los fenómenos de pequeña escala, en donde la materia y la energía se determinan de la misma manera, como ondas [...] Si queremos entender la naturaleza fundamental del universo físico, debemos de dirigir nuestra atención a estos fenómenos de pequeña escala. Aquí, la naturaleza última de las cosas se encuentra oculta, y estamos encontrando que son ondas [...] es suficiente hacer notar que la ciencia moderna ha viajado muy lejos de la vieja visión que consideraba al universo simplemente como una colección de fragmentos duros de la materia, en donde las ondas de radiación de vez en cuando aparecían como un incidente. (Jeans, 1930, p. 39)

En el estilo de Jeans se hace evidente el uso de analogías para ejemplificar algunos de los fenómenos que expone. En ellas alude a objetos cotidianos con los que permite crear una imagen mental en el lector, y así, favorecer el entendimiento de la exposición. De manera similar a la exposición de Eddington, Jeans no se enfoca en presentar a los personajes que se involucraron en la primera etapa de la teoría cuántica, sino que su discurso se concentra en mostrar el desarrollo de los hechos que permitieron conformar la primera etapa de la teoría. Es importante señalar que James Jeans, después de presentar las implicaciones que la teoría cuántica acarrió, procede a relacionar ciertas particularidades, como el indeterminismo con aspectos del libre albedrío⁴⁵.

Con el estudio y apuntes de James Jeans se logra uno de los objetivos que hemos perseguido en, al menos, esta sección: mostrar las interrogantes y oposiciones que surgieron en los indicios de la teoría cuántica. Jeans, recordemos, presenta a sus lectores la nueva visión del mundo que se tuvo que acoger al adoptar el comportamiento dual en los componentes mínimos de la materia.

La física nueva y los cuantos (1937) de Louis de Broglie

Pasemos al texto de Louis de Broglie titulado *La física nueva y los cuantos* (1937), publicación que fue editada por primera vez por Flammarion, una editorial que se centró en la literatura popular y dirigida a un público amplio. En el momento de esta publicación, De Broglie ya era ampliamente reconocido dentro del círculo de científicos a raíz de las aportaciones que había hecho a la física cuántica, además de que había recibido el premio

⁴⁵ Sobre esto se hablará en la sección 2.2 “Representación de la característica del Indeterminismo en la física cuántica a través de los textos divulgativos”.

Nobel en 1929 por el estudio de la naturaleza ondulatoria de los electrones, la cual ya se había confirmado experimentalmente.

Nos centraremos aquí en cómo se presenta la característica de dualidad. En el texto de De Broglie hay dos apartados en donde se desarrolla, en mayor o menor medida, la concepción de una naturaleza dual en la luz y en la materia: “La aparición de los cuantos en la física” y “Mecánica ondulatoria”. En ellos nos detendremos para revisarlos en esta sección.

En el primero, De Broglie se dedica a mostrar algunas diferencias fundamentales entre las teorías de la física clásica, las ideas precuánticas y la teoría cuántica. Por mencionar una, el físico francés indica que las teorías de la física clásica siguen un postulado común, que consiste en la posibilidad de representar el estado del universo físico por elementos distribuidos en el marco del espacio de tres dimensiones y que evolucionan de una manera continua en el curso del tiempo, situación que, nos dice, no se cumple con la física cuántica.

En el momento de hacer referencia al cuanto de acción, De Broglie indica que este elemento implica “una especie de interdependencia entre la localización de un objeto en el espacio y en el tiempo y su estado dinámico, la que era completamente insospechada por la física clásica”. Precisa que la dificultad de enfrentarnos con la física cuántica reside en la búsqueda de una descripción del mundo a partir del marco del espacio y tiempo en el que está basada nuestra experiencia habitual, de ahí el “carácter misterioso que presenta para nosotros la noción de cuanto de acción”. (De Broglie, 1941, p. 102)

En otro apartado, De Broglie se dedica a describir el problema del cuerpo negro y cómo las teorías establecidas en la época no lograban “prever la composición espectral de la radiación negra correspondiente a una temperatura dada”. Después de esto se dedica a presentar la solución que dio Max Planck, quien tuvo una “idea genial [...] al introducir un elemento nuevo, claramente extraño a las concepciones clásicas [...] asentando el famoso postulado de que la materia no puede emitir energía radiante más que por cantidades finitas proporcionales a la frecuencia [donde] el factor de proporcionalidad consistiría en la célebre constante h de Planck”. De Broglie indica que se trató de una idea revolucionaria pero que, en la época en la que Planck postuló lo anterior, los físicos contemporáneos no comprendieron inmediatamente su importancia, sino que solamente se le había considerado como “un medio ingenioso”.

No obstante, esta percepción por parte de los físicos no duraría mucho: poco a poco se puso “en evidencia la importancia fundamental de la idea de Planck”. Los físicos

comenzaron a advertir que la discontinuidad era algo incompatible con las ideas generales que servían hasta entonces de base a la física, por lo que se exigía una revisión completa de estas nuevas ideas. Algo que destaca De Broglie en el escrito es que en ese momento ya habían pasado alrededor de cuarenta años después del descubrimiento de Planck, y que “todavía estaban muy lejos de comprender todo su alcance y haber agotado todas las consecuencias”. Esta última frase de De Broglie tiene, en alguna medida, vigencia en nuestros días.

Enseguida de la exposición relacionada con la aportación de Planck, De Broglie dedica algunas páginas a describir detalladamente el efecto fotoeléctrico y la explicación dada por Einstein en la que, según dice el autor, mostraba “la necesidad de unir la concepción granular y la de las ondas” para lograr una explicación satisfactoria. Para concluir el capítulo, presenta otros fenómenos en donde se podría aplicar la hipótesis de los cuantos y que representan confirmaciones a esa nueva idea.

A continuación, veremos el capítulo titulado “La mecánica ondulatoria”. En él, De Broglie vuelve a recordar el papel que jugó el estudio del efecto fotoeléctrico, como una notable confirmación de los cuantos de luz, por lo que se “había de admitir de buen o mal grado que la imagen de las ondas y la imagen de los corpúsculos debían ser, alternativamente, utilizadas para la descripción completa de las propiedades de las radiaciones [...] en el que la dualidad estaba íntimamente vinculada a la existencia misma de los cuantos”. (De Broglie, 1941, p. 163)

Ante eso, surgía la pregunta: “¿no debe suponerse que el electrón presente una dualidad de aspecto análogo a la de la luz?”. Esto representaba, a primera vista, “una idea muy arriesgada, pues hasta allí el electrón había mostrado siempre asimilable a un mundo material cargado eléctricamente y obedeciendo a la dinámica clásica”.

Luis de Broglie presenta el corpúsculo y su onda asociada como “la asociación del movimiento de todo corpúsculo a la propagación de cierta onda, estando las magnitudes características de la onda ligadas a las magnitudes dinámicas por relaciones en las que figurará la constante h ”; para ello, dicha vinculación entre el corpúsculo y su onda asociada “tenía que ser exactamente la misma que la que había utilizado Einstein para asociar el fotón a la onda luminosa, de tal manera que se lograra una ‘notable síntesis’”.

A través de la exposición que da Louis de Broglie, se puede advertir que en continuas ocasiones hace alusión a la relevancia que implicó la postulación del cuanto de acción o constante de Planck para el desarrollo de la nueva física cuántica, en la que necesariamente

“se requeriría una modificación profunda de los conceptos fundamentales de la física clásica, modificación que está contenida en germen en la existencia misma de los cuantos de acción”. (De Broglie, 1941, p. 174)

Después de la exposición de la onda material, se hace énfasis en la preocupación por dar una interpretación física de todos los elementos que se habían desarrollado y que, en ese momento, ya conformaban una nueva mecánica, la mecánica ondulatoria.

La evolución de la física (1938) de Albert Einstein y Leopold Infeld

Para continuar con la exposición de los textos divulgativos, seguiremos con *La evolución de la física* de Albert Einstein y Leopoldo Infeld, libro publicado en 1938. En particular, nos detendremos en el capítulo titulado “Los cuantos”. Dicho capítulo comienza mostrando la diferencia de los conceptos de continuidad y discontinuidad a través de una analogía. A continuación, observemos cómo los autores construyen esta analogía con el fin de clarificar al lector qué o cuáles son los puntos centrales de la teoría; cabe señalar que la siguiente cita, aunque larga, nos sirve para exponer el estilo de los autores, mismo que es llevado durante todo el escrito:

Supongamos que tenemos ante nosotros un mapa de la ciudad de Barcelona y sus alrededores. Nos preguntamos: ¿a qué puntos de este mapa puede llegarse en tren? Con una guía de ferrocarril a mano, nos será fácil hallarlos y marcarlos en el mapa. Preguntémosnos ahora: ¿a qué puntos se podrá llegar viajando en coche? Si se trazan, sobre el mismo mapa, líneas que representen todos los caminos que desembocan en Barcelona, puede llegarse en automóvil a cada uno de sus puntos. En ambos casos tenemos conjuntos de puntos. En el primero, los puntos señalados están separados entre sí y representan caminos. Ahora bien, quisiéramos saber a qué distancia de Barcelona está cada uno de esos puntos o, para ser más exactos, deseamos conocer su distancia respecto de determinado lugar de la ciudad. Estas distancias pueden hallarse fácilmente en el mapa si viene acompañado de la escala a que fue dibujado. Obtendremos, así, en el caso de las estaciones, números que representarán la distancia de cada una de ellas al lugar en cuestión. Estos números cambian de valor de manera irregular, por saltos o tramos finitos. Lo cual se expresa diciendo: las distancias de Barcelona a los lugares accesibles en tren varían de manera discontinua. Los lugares a que es posible llegar en automóvil cambian en cantidades tan pequeñas como se quiera; es decir, varían de manera continua. El aumento o disminución del camino recorrido se puede hacer tan pequeño como se quiera yendo en automóvil, pero no viajando en tren [...] Entonces, ciertas magnitudes cambian de manera continua y otras discontinuamente, o sea, por cantidades que no se pueden reducir indefinidamente. Estos pasos indivisibles, mínimos, se llaman los cuantos elementales de la magnitud en cuestión. (Einstein, A., Infeld, 1993, p. 199)

Además de este ejemplo para clarificar los conceptos de continuidad y discontinuidad, los autores desarrollan otros tres con el mismo propósito, pues señalan que la idea principal

de la teoría de los cuantos radica en esta diferencia. Advierten que dentro de la física cuántica “se debe admitir que ciertas magnitudes físicas consideradas como continuas [hasta ese momento] están compuestas de cuantos elementales”.

Posteriormente, la exposición se centra en “los cuantos de luz” en donde los autores refieren el efecto fotoeléctrico y cómo las predicciones que se tenían a partir de la teoría ondulatoria fracasan frente a la experiencia. Para Einstein e Infeld el efecto fotoeléctrico “enseña, con la máxima claridad y simplicidad, la necesidad de modificar los conceptos anteriores”. Con la nueva teoría se supondría que la luz está compuesta de granos de energía, que tomarán el nombre de fotones, los cuales estarán determinados por cierta cantidad de energía. Para los autores, a partir de la nueva teoría se genera un conflicto con la física clásica y con la experiencia.

A pesar de aceptar el supuesto de que la luz está compuesta de granos de energía, el cuestionamiento sobre la naturaleza real de la luz permanecía suspendido, pues hasta cierto momento no quedaba claro si se trataba de una onda o de fotones. Infeld y Einstein tratarán de responder a esa incógnita; indican que aparentemente “debiéramos usar a veces una teoría y a veces otra mientras que en ocasiones se puede emplear cualquiera de las dos”, por lo que se presenta otra dificultad referente a “dos imágenes contradictorias de la realidad”. En este sentido se trataría de un problema fundamental relacionado con el carácter dual.

Como parte de la presentación del comportamiento dual de la materia o de las “ondas de materia”, los autores inician con una descripción de los tipos de ondas, como las ondas por oscilación y por reflexión, las cuales conforman las que son llamadas ondas estacionarias. A partir de la distinción entre las ondas, indican que en este último tipo de ondas se pueden encontrar las “características típicas de la teoría de los cuantos”, pues en la longitud de onda de las estacionarias se presentan cambios discontinuos, característica que juega un papel importante para la nueva teoría cuántica.

Los autores ejemplifican la onda estacionaria con las cuerdas vibrantes de un violín. Indican que cada cuerda vibrante tiene su propio espectro, “circunstancia que se asemeja a los elementos químicos pues cada uno de ellos emite una radiación en particular”. Para tratar de aclarar lo anterior, desarrollan una analogía para describir el comportamiento de los átomos en relación con los instrumentos musicales: “los átomos de todos los elementos están formados de partículas elementales [...] Un sistema tal de partículas se comporta como un diminuto instrumento acústico en el cual se producen ciertas ondas estacionarias”

(Einstein, A., Infeld, 1993, p. 221). Una de esas partículas sería el electrón, el cual posee un movimiento uniforme y, por lo tanto, ondas de longitud determinada. De esta manera, vinculan la descripción anterior con la idea que había introducido Louis de Broglie respecto a un comportamiento dual en los objetos mínimos de la materia, a partir de señalar el comportamiento ondulatorio de los electrones, “idea que a primera vista parece extraña e incomprensible”.

Con respecto a esto último, Einstein e Infeld dicen que este tipo de ideas fundamentales “desempeñan un papel esencial en la formación de una teoría física [...] Pero son los pensamientos e ideas, no las fórmulas, los que constituyen el principio de toda teoría física. Las ideas deben, después, adoptar la forma matemática [...] para hacer posible su confrontación con la experiencia”. (Ibid., p. 222)

La exposición de los autores está basada esencialmente en la presentación de ejemplos y analogías con elementos cotidianos, lo que permite evocar una imagen y entender la idea esencial que se proponen mostrar. Lo que buscan es “encontrar una respuesta razonando en vez de buscarla directamente por vía experimental”, de tal manera que los argumentos que son expuestos están basados en esta idea. Otra particularidad es que en ningún momento introducen formulaciones matemáticas; toda la presentación se desarrolla a partir de una narración o descripción de fenómenos, además de la exposición de los razonamientos que muestran indirectamente los conflictos a los que se enfrentaron los primeros físicos que apoyaron al desarrollo de la física cuántica. Por otra parte, este texto también se caracteriza por las alusiones reiteradas a la transformación conceptual que representó la nueva teoría.

“Snooker cuántico” (1940) y Biografía de la física (1961) de George Gamow

Para continuar veamos dos textos del cosmólogo ruso-estadounidense George Gamow: su cuento “Snooker Cuántico” (1940) y el libro *Biografía de la Física* (1961).

Este escritor emprendió su actividad de divulgador durante una estancia en Estados Unidos, mientras que también trabajaba como profesor de la Universidad de Washington y se dedicaba a sus investigaciones en cosmología.

El cuento elegido se encuentra en *El nuevo breviario del Señor Tompkins*, una nueva edición que recopila los cuentos que en un primer momento aparecieron en *El maravilloso mundo del Señor Tompkins*. La narración de estos cuentos se basa en las aventuras del

personaje principal, el señor Tompkins, un banquero que se adentró en distintas aventuras que le permitían conocer aspectos sobre el comportamiento de la naturaleza, mismas que se vinculan con la teoría de la relatividad o la teoría cuántica.

En “Snooker Cuántico”, el señor Tompkins asiste a una conferencia dedicada a la teoría cuántica, la cual está a cargo de un físico y está dirigida a un público general. A través de este cuento, Gamow presenta la noción de discontinuidad. En el desarrollo de la conferencia, por medio del personaje del físico se indica que en los inicios del siglo XX aparecieron datos empíricos que produjeron conclusiones complejas en relación con el entendimiento de la realidad; una de estas conclusiones es: “la existencia en la naturaleza de un límite inferior de interacción que nunca puede ser reducido” (Gamow, 2009, p. 132). Al escribir esto, el profesor prosigue haciendo una aclaración en la que sugiere que ese “límite natural” es tan pequeño que resulta “insignificante en la mayoría de los procesos con los que estamos familiarizados en la vida cotidiana”, pero no resulta insignificante en la escala de los átomos y moléculas.

Al haber presentado lo anterior, en la conferencia que dirige el profesor se expone de manera breve la aportación de Einstein, refiriéndose a ella como un avance posterior a la idea de Planck. Sobre esto no profundiza, solamente indica que la conclusión de Einstein radica en la afirmación de que la radiación es emitida como si fueran “paquetes de energía [...] llamados cuantos de luz o fotones”. Unas líneas más adelante, Gamow, a través de las palabras del profesor, otorgaría una explicación “de los niveles de energía discretos de los electrones que forman los átomos” al vincular el comportamiento ondulatorio a los electrones. Ante esto, el profesor advierte que “la naturaleza ondulatoria de las partículas sólo tiene importancia cuando el movimiento se produce en regiones tan pequeñas como el interior de átomos y moléculas”. (Gamow, 2009, p. 137)

Cabe señalar que en este cuento no hay una descripción sobre la catástrofe ultravioleta o el problema del cuerpo negro; sólo se limita a mencionar que fue el físico Max Planck quien reflexionó “sobre las condiciones de equilibrio entre materia y radiación” y llegó a la conclusión de que “ningún equilibrio de este tipo es posible si la interacción entre materia y la radiación se realiza en forma continua”, esto es, que la “energía transferida entre la materia y la radiación se da en una secuencia de choques separados”. Líneas después, el autor indica que la introducción del cuanto de energía o h , tuvo que ser “aceptada” por Planck. Al referirse a una aceptación, el autor deja implícito que la aportación de Planck no se trató de un elemento que se aprobó sin un cuestionamiento

previo. No obstante, esto solamente se deja entrever, pues no hay un antecedente en el texto que indique las causas de una preocupación por aceptar la constante de Planck.

Por otro lado, continuemos con la presentación de otro texto divulgativo. Esta vez será el de *Biografía de la Física* (1961), también de George Gamow. En este texto nos enfocaremos en el séptimo capítulo titulado “La ley de los cuantos”. Aquí, el autor dedica una sección para presentar la catástrofe ultravioleta, momento de la física que describe como “un sufrimiento de la angustia de la metamorfosis desde la larva clásica a la mariposa moderna”. Después de dar esta imagen, prosigue a describir detalladamente en qué consistió el problema del cuerpo negro; para ello se apoya en un experimento mental llamado “cubo de Jeans”, el cual había sido planteado por el físico inglés James Jeans. En ese experimento mental se llega a la conclusión de que, en un momento dado, la energía del objeto negro se prolongará al infinito y que en el momento en el que se “abra la puerta del horno (o cubo) seríamos alcanzados por la mortal radiación de las ondas cortas y moriríamos inmediatamente”.

Esta conclusión resulta absurda, siguiendo las palabras de Gamow, pero se trata de una conclusión derivada de la “aplicación de las leyes más fundamentales de la física clásica a la energía radiante”. Gamow sugiere posteriormente que fue Max Planck quien dio solución a dicha problemática al considerar la radiación electromagnética como constituida por “paquetes individuales de energía con cantidades bien definidas de energía por paquete”, lo cual se diferencia de la apreciación que se tenía antes, que se asemejaba a “trenes continuos de ondas”. De esta manera, “la introducción de paquetes individuales de energía en la concepción clásica de la propagación ondulatoria de la luz ha producido una revolución de ideas únicamente comparable a la que resultó el experimento de Michelson-Morley”⁴⁶. (Gamow, 2010)

Es necesario mencionar que Gamow se refiere a la resolución de Planck como una idea revolucionaria, al haber planteado que la radiación está constituida por paquetes discretos de energía. No obstante, en el texto, Gamow no se detiene en presentar las implicaciones y cuestiones que acarreó.

De la misma manera que la mayoría de los textos que hemos observado, después de explicar la aportación de Planck, el autor presenta la contribución de Einstein con los

⁴⁶ Experimento realizado en 1887 por los físicos Albert Michelson y Edward Morley, el cual constituyó una prueba en contra de la teoría del éter, que posteriormente se establecería como un fundamento experimental para la teoría especial de relatividad de Einstein.

cuantos de luz. Gamow indica que con la aportación de Einstein la propuesta que había dado Planck “cobró una forma más definida”; prosigue con la aportación de De Broglie, la postulación de las ondas de materia. En ambas presentaciones describe en qué consistió el avance y su relación con el cuanto de acción.

La exposición que Gamow hace en *Biografía de la física* muestra ciertas diferencias con los cuentos recopilados en *El nuevo breviario del Señor Tompkins*, en principio por la extensión de la exposición, pero también en los detalles con los que explica cada fenómeno, detalles que se centran en exponer los resultados experimentales. Así mismo, se puede observar que la narración de Gamow aporta información biográfica de la mayoría de los científicos a los que alude, permitiendo de esta manera crear una imagen del contexto entre el personaje y la explicación alcanzada a los fenómenos presentados.

El carácter de la ley física (1965) de Richard Feynman

Analizaremos ahora el texto de Richard P. Feynman, físico estadounidense que ha sido reconocido en el área por la formulación de la teoría de la electrodinámica cuántica (QED, por sus siglas en inglés) y también por su labor docente, así como por el entusiasmo que mostraba en cada una de sus clases. Además, también ha sido reconocido en el área de la divulgación por el interés que mostró en fomentar la cultura científica y los varios trabajos que realizó para difundir la física a un público amplio. Entre esos trabajos encontramos la publicación titulada *El carácter de la ley física (1965)* texto que surgió como una recopilación de siete conferencias impartidas durante 1964 en la Universidad de Cornell.

Feynman afirma que la conferencia sobre “Probabilidad e incertidumbre. La visión de la naturaleza a través de la mecánica cuántica”, la cual retomaremos aquí, se trata de la “conferencia más difícil de todas, debido a que es abstracta y alejada de la experiencia cotidiana” (2005, p. 143). En el inicio de su exposición, presenta la transición de cómo las explicaciones en la antigüedad estaban basadas en la intuición, pero con la necesidad de abarcar más fenómenos por explicar se fueron determinando leyes, con explicaciones más consistentes que en principio se encuentran muy alejadas de lo intuitivo. Para Feynman, una herramienta fundamental que permite expandir las explicaciones y al mismo tiempo el entendimiento de ciertos fenómenos es la experimentación de la ciencia, que permite ampliar nuestra visión del mundo para captar cosas que “sí están ahí”, a diferencia de las

explicaciones que pueden surgir de la imaginación, pues con ella se crean cosas que no existen.

Esta idea funciona para el autor como introducción para hablar de manera rápida sobre los cambios que se dieron a lo largo de la historia sobre la comprensión del fenómeno de la luz. Feynman menciona que para las distintas explicaciones de este fenómeno la experimentación jugó un papel importante para la aceptación de cada una de las ideas que iban surgiendo⁴⁷.

Feynman da pie al asunto central de su exposición explicando cómo se comporta la naturaleza en escala microscópica; sin embargo, hace una advertencia sobre las preguntas que pueden surgir en el camino: para él no tiene sentido preguntarse “porque se entrará en un callejón del que nadie ha conseguido salir todavía”. En esta última declaración, es posible detectar que las preocupaciones o debates que pudieran surgir al observar los fundamentos de la teoría no tienen sentido para Feynman, minimizando la importancia que pudieran tener esas discusiones.

Al adentrarse en la historia de la luz, el autor presenta varias investigaciones que fueron surgiendo a lo largo de la historia de la ciencia y que lograron modificar el entendimiento sobre el comportamiento de la luz. En este sentido, Feynman vuelve a aludir al papel de la experimentación como una herramienta de gran importancia para la aceptación de cada una de las propuestas que fueron apareciendo. En ese brevísimo recorrido que Feynman transita indica: “al principio se pensaba que la luz se comportaba de manera parecida a una lluvia de corpúsculos, como gotas de agua o balas de ametralladora”, después se afirmaría que este fenómeno seguía un comportamiento que se asemejaba a ondas, después con el efecto fotoeléctrico se regresaría a la concepción de partículas. Todo esto, para el físico estadounidense, derivó en una confusión que fue resuelta entre los años de 1925 y 1926, cuando fueron establecidas las ecuaciones de la mecánica cuántica. Con esa nueva teoría física se estaría afirmando que tanto los fotones como los electrones tenían el mismo comportamiento dual, situación que resulta difícil de comprender dados nuestros esquemas de conocimiento basados en los fenómenos que ocurren a nuestra escala.

La estrategia que utiliza Feynman para presentar al público no especializado el comportamiento dual de estos elementos microscópicos, alejados de nuestra experiencia

⁴⁷ Cfr. “Antecedentes sobre la dualidad onda-partícula de la materia”, para ver las distintas explicaciones que se dieron al fenómeno de la luz..

cotidiana, es exponer qué es lo que pasa a partir del experimento de la doble rendija⁴⁸. De acuerdo con él, se trata del experimento que “contiene todo el misterio de la mecánica cuántica” y muestra “un fenómeno que resulta imposible, absolutamente imposible de explicar clásicamente”. Para el autor es evidente que puedan surgir cuestiones derivadas del asombro que ocasiona esta cualidad, pero tales preguntas carecen de trascendencia al no poder ser resueltas.

En un principio, Feynman afirma que no recurrirá a analogías, que simplemente se dedicará a describir lo que sucede; sin embargo, más tarde informa al público, o al lector, que la explicación que él hará será una mezcla de analogía y contraste. Contraste en el sentido de que la imagen propuesta a partir del experimento se tiene que relacionar, de alguna manera, con elementos que nos son fáciles de identificar. Para hablar de partículas el autor utiliza la imagen de las balas, mientras que las ondas se asemejarán a las ondulaciones que se producen en la superficie del agua. El orden de la exposición de Feynman es la siguiente: primero presenta lo que sucede con las partículas como balas; después, qué sucede con las ondas; por último, expone qué pasa con los electrones o fotones.

Lo interesante de todas estas descripciones surge cuando se presenta el experimento con los electrones, los cuales los representa como balas.

Cuando se realiza el experimento con balas, las curvas resultantes del patrón de su llegada están en función de las rendijas abiertas. Es decir, cuando las dos rendijas están abiertas se generan dos curvas enseguida de cada una de las rendijas por las que pasaron las balas. Si una de las rendijas se encuentra cerrada, el paso de las balas se reduce y solamente se genera una curva representativa. Por otro lado, cuando el experimento se realiza con el agua u ondas, las curvas que surgen cuando ambas rendijas están abiertas reflejan un fenómeno de interferencia, resultado que se diferencia del obtenido con las balas. Sin embargo, cuando una de las rendijas está cerrada la curva resultante es semejante a la que se generó con el experimento de las balas cuando una de las rendijas permanecía cerrada, es decir, solamente se genera una curva.

Por último, con el experimento de los electrones, las curvas resultantes, cuando uno de los agujeros está cerrado, se asemejan a las curvas que se presenciaron en el experimento de las balas o el agua, esto es: solamente se refleja una curva posicionada después de la rendija abierta. Pero cuando ambas rendijas están abiertas se obtienen las

⁴⁸ Se ha dispuesto en el APÉNDICE C la descripción de Feynman de este experimento.

curvas que corresponden al fenómeno de interferencia, como si fueran ondas. Este resultado Feynman lo resume de la siguiente manera:

Los electrones llegan en unidades enteras, como partículas, pero la probabilidad de llegada de estas partículas se determina de la misma manera que la intensidad de las ondas. Es en este sentido en el que se dice que los electrones se comportan a veces como partículas y a veces como ondas. Se comportan de dos maneras distintas al mismo tiempo. (Feynman, 2005, 153).⁴⁹

Lo primero que presenta Feynman en este primer acercamiento al experimento de la doble rendija, es el comportamiento dual de la materia, o de los electrones. Como observamos, la exposición se basa en el experimento mental y no sigue la historia de la ciencia para mostrar la evolución en el pensamiento, solamente muestra cómo son los hechos a partir de la argumentación y el razonamiento en el experimento. Cabe señalar que, como el mismo Feynman lo advirtió, las preguntas que pudieran surgir por falta de una correspondencia con nuestra intuición habrán de ser pasadas por alto, pues difícilmente se llegaría a una conclusión.

El Tao de la física (1975) de Fritjof Capra

Finalizaremos con la publicación del físico austríaco Fritjof Capra (1939 -): *El tao de la física* (1975). Considerarla en este estudio cobra importancia porque se ha catalogado como un texto divulgativo que ha tenido gran éxito y alcance, llegando a clasificarse como *Best Seller* con 43 ediciones y traducido a 23 idiomas. La característica principal de este texto es que su contenido está dedicado a promover la relación entre concepciones propias de la física, en las que se incluye la física cuántica, con aspectos de conciencia y misticismo oriental. Esta situación ha provocado interpretaciones erróneas por parte del público lector y a la vez ha servido de texto de referencia para propagar el vínculo entre misticismo oriental y física cuántica. Según David Kaiser (2011), el éxito del libro de Capra se debió a las condiciones ideales en el momento en el que publicó⁵⁰.

⁴⁹ Aquí de nuevo cabe señalar que la manifestación de onda o partícula dependerá del arreglo experimental. Sin embargo, la forma en que lo presenta Feynman podría resultar confusa, pues en una misma frase menciona que los electrones se comportan “a veces como partículas” y “a veces como ondas”, y también nos dice que ambos comportamientos se dan “al mismo tiempo”. Como ya lo habíamos dicho anteriormente, el aludir que la característica dual se presente en un mismo tiempo podría ocasionar mal entendidos en el lector.

⁵⁰ Cfr. En el tercer capítulo de esta tesis se hace un análisis más profundo de este texto. Aquí solamente nos enfocaremos a mostrar cómo Capra muestra paralelismos entre la idea de dualidad onda-partícula con ideas de religiones orientales.

Observemos qué paralelismos hace con la noción del comportamiento dual formulado por la teoría cuántica y algunas ideas recogidas de las filosofías orientales, como el taoísmo, el budismo y el hinduismo. En pocas líneas Capra se dedica a describir de manera breve cómo en “el nivel atómico, la materia posee un aspecto dual”, y además afirma que tal dualidad también se presenta en “la luz y en todas las demás radiaciones electromagnéticas”. Para ejemplificar este comportamiento dice:

A los electrones se les considera normalmente partículas, sin embargo, cuando un rayo de tales partículas es enviado a través de una pequeña hendidura, resulta refractado exactamente del mismo modo en que lo haría un rayo de luz, en otras palabras, los electrones a su vez, se comportan como ondas. (Capra, 2012, p. 61)

De acuerdo con Capra, el aspecto ondulatorio es algo sorprendente que dio origen a muchos de los “koanes cuánticos”, sin embargo, sólo menciona esta última noción y no determina a qué se está refiriendo. Al revisar dentro del contenido del texto, Capra indica que la concepción de “koanes” proviene del concepto de “koans”, el cual se refiere a adivinanzas absurdas que utilizan los maestros Zen para transmitir enseñanza (Capra, 2004, p. 17). En este sentido los “koanes cuánticos” podrían estar refiriendo algún tipo de enseñanza que proviene del absurdo; sin embargo, ésta es una interpretación vaga.

Después de haber aludido al concepto de “koanes”, Capra se dedica a dar una descripción de los fenómenos ondulatorios y señala la relación que tienen estos fenómenos con “la naturaleza estadística de la teoría cuántica”, haciendo énfasis en que los fenómenos atómicos sólo pueden ser descritos en términos de probabilidades. A continuación, dice:

Las ondas de probabilidad resuelven en cierto sentido el absurdo de las partículas que son ondas, llevándolo a un contexto totalmente nuevo, pero al mismo tiempo nos conducen a otro par de conceptos opuestos tal vez más fundamental todavía: los de la existencia y la no existencia. Este par de opuestos también es trascendido por la realidad atómica. [...] El trascender los conceptos de existencia y no existencia constituye también uno de los más asombrosos aspectos del misticismo oriental. (Capra, 2004, p. 62)

Con la cita anterior observamos el tipo de vínculos que realiza al exponer aspectos de la teoría cuántica. No obstante, hay que señalar que las características que presenta sobre la teoría reflejan la concepción esencial del significado que se le da a través de la interpretación de Copenhague de la teoría, pero no se presenta un límite claro entre lo que corresponde a las ideas místicas y cuáles son las fronteras de la conceptualización en la teoría cuántica. Además, otro punto a señalar es que la cantidad de información correspondiente a las ideas místicas es mucho mayor que las descripciones científicas.

Comentarios sobre la representación divulgativa del comportamiento dual de la materia

Lo que abordamos en la presente sección fueron las problemáticas teóricas a las que se enfrentó la física a finales del siglo XIX y principios del XX: el problema del cuerpo negro y la catástrofe ultravioleta. La resolución de estas problemáticas permitió que surgieran las primeras ideas que posteriormente darían lugar a la teoría de la física cuántica. No obstante, el camino que se construyó para su resolución implicó el cuestionamiento de algunos supuestos aceptados por la física clásica. Es en este sentido que aparecieron controversias en la comunidad de físicos.

En un primer momento, la resolución de Planck se veía con recelo dado que el carácter discontinuo en la energía se oponía a ideas preconcebidos desde la física clásica; esto provocaría reflexiones filosóficas respecto a la ontología de la física, pues se llegó a cuestionar la idea de causalidad. Frente a esta situación, fue difícil que los físicos aceptaran rápidamente esta idea. A pesar de ello, la resolución de Planck le permitió a Einstein dar cuenta del efecto fotoeléctrico, y a su explicación se sumaba la idea de que el fenómeno de la luz tendría un comportamiento dual, es decir, una conducta de onda y partícula. Más tarde, De Broglie propondría que los componentes mínimos de la materia también tendrían ese comportamiento. Todas estas transformaciones a lo que se conocía desde la física clásica sucedieron en un lapso relativamente breve, desde que Planck dio solución a la catástrofe ultravioleta en 1900 hasta la propuesta de De Broglie en 1924. A estas aportaciones se les ha conocido como ideas o teorías precuánticas, pues hasta ese momento todavía no se establecía el formalismo ni alguna interpretación.

Al momento de analizar los textos de divulgación elegidos observamos que hay quienes comienzan exponiendo la teoría cuántica a partir de la aportación de Planck, algo a destacar es que no se expone el contexto en el que surgió su contribución, pues no se indica la problemática teórica a la que dio solución, ejemplo de ello es el texto de Eddington y el cuento de Gamow. En el texto de Einstein e Infeld, pasa algo similar, en el sentido de no mostrar el contexto del cual surgieron las primeras ideas cuánticas, sin embargo, ellos se enfocan en presentar el significado de los conceptos y las implicaciones de aceptar el comportamiento dual y, a la vez, discontinuo de la luz. De manera similar, hay quienes muestran de manera general lo que significa la idea de discontinuidad, pero no se detienen a presentar las implicaciones y controversias que acarrearán esas nuevas conclusiones. Algo que se destaca en todos los textos analizados es que en ellos se refleja el asombro que

ocasionó la resolución de Planck y las nuevas explicaciones que se derivaron de ella, pero como hemos visto, no se reflexiona un poco más sobre el porqué de ese asombro, de tal manera que las reflexiones filosóficas que subyacen a ello apenas se perciben.

La importancia de considerar estos antecedentes para la divulgación de la física cuántica reside en brindarle un contexto al público de cómo fueron evolucionando las ideas a partir de una problemática planteada, y en este sentido, se incorporaría y se mostraría el proceder de la ciencia.

En la siguiente sección abordaremos otro de los conceptos característicos de la física cuántica del que se han desprendido disentimientos respecto a su significado epistemológico y ontológico: el indeterminismo.

2.2

Representación de la característica de indeterminismo en la física cuántica a través de textos divulgativos

Transición del supuesto determinista al indeterminismo

La búsqueda de las causas ha sido una constante en la historia de la ciencia; el hombre siempre ha intentado interpretar los sucesos para, en un momento dado, poder predecir eventos futuros. Dicho de otro modo: se busca una explicación de los fenómenos de la naturaleza respondiendo a los cuestionamientos qué, cómo y por qué. Esto se ha dicho *grosso modo*, pues el concepto de “explicación” ha sido una noción que se ha discutido a lo largo de la filosofía de la ciencia y que necesitaría mayores precisiones. Pues bien, en el ideal de buscar explicaciones, se implica también el ideal de obtener las causas y a partir de ellas predecir hechos. Es en esta última idea donde se pueden identificar elementos tácitos de la concepción de determinismo, concepto que ha sido considerado como un principio en la ciencia física.

Podemos remitirnos a la creación de mitos en la antigüedad como un antecedente a la necesidad del hombre por dar explicaciones. Lo que se buscaba con estas historias era generar una clase de explicación para dar cuenta de los fenómenos naturales. Una particularidad de estos relatos es que estaban justificados en la intervención de los dioses, pues ellos jugaban un papel fundamental en la cadena de acontecimientos que provocaban cierto fenómeno a explicar. No obstante, con este tipo de “explicaciones” no existía la posibilidad de predecir eventos; la idea de un determinismo no estaba bien establecida.

Al acercarnos al concepto de determinismo en la ciencia, una de las primeras referencias con la que nos encontramos es la concepción del filósofo francés Pierre Simon de Laplace (1749-1827), quien describe dicho concepto de la siguiente manera:

Debemos considerar el estado presente del universo como una consecuencia de su estado previo y como la causa del estado que seguirá. Una inteligencia que conozca todas las fuerzas que actúan en la naturaleza en un instante dado así como también las posiciones momentáneas de todas las cosas en el universo, sería capaz de comprender en una sola fórmula los movimientos de los cuerpos más grandes como también los de los átomos más ligeros en el mundo, con tal de que su intelecto fuera lo suficientemente poderoso para someter todos los

análisis; para ella nada sería incierto, tanto el futuro como el pasado estarían presentes simultáneamente ante sus ojos. (Laplace, 1988, p. 25)

De la cita anterior se puede extraer la idea fundamental del concepto de determinismo que se presupone en la física clásica, en el cual se afirma que a partir del conocimiento de las posiciones y las fuerzas implicadas de un objeto en un momento inicial se podrá calcular el desplazamiento de dicho objeto en momentos posteriores, o bien, calcular sus posiciones en momentos pasados. Ahora bien, el concepto de causalidad se refiere, dicho de manera general, a la sucesión temporal de los fenómenos físicos bajo un orden. Atendiendo los dos significados, de determinismo y causalidad, se presenta una interrelación entre los conceptos, donde pareciera que el determinismo involucra la idea de causalidad. En este sentido, en el cálculo que se alude en el determinismo se podría decir que en él está contenida la expresión matemática de la causalidad, dado que se presupone la relación de una cadena continua de eventos. Así, con la causalidad se hace referencia a la sucesión temporal de los fenómenos físicos, mientras que con el determinismo se postula la previsión de estas sucesiones a partir de los cálculos matemáticos.

Antes de proseguir, es interesante señalar que en la historia de la filosofía se ha presentado la idea de finalismo de Aristóteles (384-322 a.C.) como la teoría opuesta al determinismo y no el indeterminismo, como se pudiera pensar. Con el finalismo o teleología se creía que el comportamiento de los seres vivos, así como de los seres inertes, estaba en función del fin último que cada uno de los seres u objetos tenía, es decir, la conexión entre sucesos no seguía propiamente una causalidad, sino que las conexiones responderían a la finalidad a la que tienden las cosas. Al acoger esta postura, se estaría afirmando la participación de algún dios con la capacidad de poner orden a la naturaleza según las finalidades de cada uno de los objetos. Al aceptar lo anterior, se puede afirmar que para conocer el proceso que siguen las cosas también se tendría que conocer la finalidad última del objeto. Esta concepción predominó en la escolástica aristotélica y se relacionó con la religión cristiana durante la Edad Media. En esta época, al aceptarse el finalismo aristotélico, la concepción de un determinismo fue rechazada porque se sospechaba que era una concepción atea.

Sin embargo, en la Edad Moderna la idea de determinismo tomó mayor fuerza. Con las teorías de Descartes (1596-1650) se enunciaba la concepción de mecanicismo en la que la realidad física se podría entender a partir de una causalidad eficiente, es decir, que

cualquier acción necesariamente provocaría un efecto, idea que claramente se distinguió de la teoría finalista de Aristóteles. Con la introducción del mecanicismo, la realidad se valoró independiente del observador y podría ser explicada por medio de procesos que se rigen por leyes causales, que en este sentido estarían sujetos a un determinismo.

El ejemplo clave en esta época ha sido la obra de Newton titulada *Principia Mathematica* (1687), en donde desarrolló todo un sistema matemático que conformaría lo que hoy se conoce como física clásica. En este escrito, la interpretación de los fenómenos se basó en la observación y la experimentación, presuponiendo como fundamento esencial la existencia de leyes matemáticas inmutables, similar al proceder de las máquinas.

A finales del siglo XIX ya se aceptaba que el funcionamiento del universo estaría determinado por leyes físicas estrictas. De acuerdo a Alastair Rae (1998), el principio determinista aparece como una consecuencia directa de los postulados de Newton y, a la vez, se toma como principio en la física clásica. No obstante, en la física cuántica se destaca la característica indeterminista en el comportamiento de las partículas. Cabe destacar que la idea de indeterminismo no resultó extraña dado que ya era considerada como una característica esencial de la naturaleza a finales del siglo XIX. Autores como Renouvier, Boutroux, Kierkegaard y Høffding (Jammer, 1966) consideraban el indeterminismo dentro de la naturaleza. De acuerdo con Jammer, a partir de sus posturas filosóficas, estos autores tuvieron una influencia en Bohr sobre sus ideas relacionadas con el indeterminismo.

Por otro lado, también es importante aludir a las ideas sobre el indeterminismo del físico y filósofo Henri Poincaré (1854-1912), quien después de haber asistido al primer Congreso de Solvay en 1911 afirmó que las ideas establecidas sobre la teoría de los cuantos, que surgieron a partir del trabajo de Planck, claramente se alejaron de las concepciones tradicionales de la física clásica; de esta forma, “los fenómenos físicos dejan de obedecer las leyes expresadas por las ecuaciones diferenciales [...] lo que significaría una revolución radical en la filosofía natural desde la época de Newton”. Poincaré continuó expresando declaraciones de este tipo y, poco antes de su muerte, señalaba que con la teoría cuántica “las leyes físicas del movimiento se enfrentarían a un nuevo aspecto que diferiría de las ecuaciones diferenciales”, en donde se valoraría la necesidad de introducir discontinuidades en las leyes de la naturaleza. De esta manera, al aceptar un distanciamiento de las ecuaciones diferenciales, se estaría modificando la concepción de causalidad que se encontraba implícita, pues en este tipo de ecuaciones se presupone la relación de una cadena continua de eventos. Poco después, estas ideas llamarían la

atención de Louis de Broglie. (Cushing, 2003; Jammer, 1966)

A pesar de la importancia y relevancia que la idea del indeterminismo iba adquiriendo, la concepción dominante de indeterminación fue la que Heisenberg presentó en 1927 en el artículo titulado “Ueber den anschaulichen Inhalt der Quantentheoretischen Kinematik und Mechanik”, traducido al inglés como “The Actual Content of Quantum Theoretical Kinematics and Mechanics”.

El término *anschaulichen* —inteligible— ha adquirido distintos significados de acuerdo al autor que lo retome; no obstante, a pesar de las variaciones que se pudieran observar, Heisenberg, al inicio de su artículo, busca especificar qué se entenderá por *anschaulich* en el ámbito de la física cuántica: “Creemos que hemos ganado *anschaulich*-comprensión de una teoría física, si en todos los casos simples, podemos comprender las consecuencias experimentales de manera cualitativa y ver que la teoría no conduce a contradicciones”. (Heisenberg, 1927. En: Hilgevoord, J., & Uffink, 2016)

De acuerdo con Hilgevoord y Uffink, esta afirmación tenía como objetivo mostrar que la mecánica matricial, que el mismo Heisenberg había propuesto un par de años atrás en 1925, podría aportar la misma claridad de la mecánica ondulatoria establecida por Schrödinger en ese mismo año⁵¹.

En 1925, la idea principal de Heisenberg era que sólo las cantidades que pudieran ser observables debían jugar un papel en la teoría, esto con el fin de evitar los intentos por formar imágenes de lo que sucede dentro del átomo. En la física atómica, los datos observacionales eran obtenidos de la espectroscopia⁵² y su asociación con las transiciones atómicas; de esta manera, Heisenberg consideró a las “cantidades de transición” como los elementos básicos de la teoría. Con el apoyo de su colega Max Born (1882-1979), quien se dio cuenta de que las “cantidades de transición” obedecían a las reglas del cálculo matricial, desarrollaron la mecánica matricial de la teoría cuántica (Hilgevoord, J., & Uffink, 2016). Este cálculo matricial permitía conocer los niveles de energía de un átomo o los saltos de electrones de una órbita a otra.

A pesar de la gran abstracción que implica esta teoría, se ajustó perfectamente a los resultados experimentales. Una característica relevante de estas matrices es que son no

⁵¹ Ambas formulaciones matemáticas, desarrolladas para dar cuenta de los fenómenos cuánticos, resultaron ser equivalentes, por lo que se generó una especie de tensión entre ambos físicos que buscaban la aceptación por parte de los colegas.

⁵² La espectroscopia mide, dicho a grandes rasgos, la emisión y absorción de radiación electromagnética.

conmutativas ($ab \neq ba$), esto quiere decir que los resultados de las mediciones estarán en función del orden en el que se realicen tales mediciones. De la no conmutatividad de las matrices de Heisenberg se desprende el fundamento de las relaciones de indeterminación, debido a la imposibilidad de obtener resultados precisos de dos magnitudes conjugadas correspondientes al comportamiento de una partícula, por ejemplo, su posición y momento, o bien, el tiempo y la energía. Solamente se obtenían probabilidades para el par de magnitudes conjugadas.

Es, pues, en el artículo de 1927 donde Heisenberg introduce la siguiente consideración: hablar de la “posición de una partícula” (o cualquier otra magnitud medible) solamente proporcionará un significado si tal magnitud (la posición) puede ser medida a través de la experimentación.

“Si queremos entender claramente qué significa ‘posición del objeto’, por ejemplo, un electrón, entonces debemos definir los experimentos con los cuales pretendemos determinar la ‘posición del electrón’. De lo contrario, tal termino carece de significado [...] Por ejemplo: ilumina el electrón y míralo bajo el microscopio. La precisión más alta que se puede alcanzar en el cálculo de la posición se determina sustancialmente por la longitud de onda de la luz utilizada”. (Heisenberg, 1927)

En este mismo artículo, Heisenberg desarrolla un experimento mental que ha sido conocido como el microscopio de Heisenberg, en el que detalla y muestra la indeterminación al describir el proceso de medición, en donde se presenta la imposibilidad de obtener resultados simultáneos de las magnitudes conjugadas.

En dicho experimento se hace la suposición de que existe un microscopio de rayos gamma que tiene la capacidad de observar un electrón⁵³. La longitud de onda de los rayos gamma, al ser muy pequeña, implicaría una mayor frecuencia y sus fotones tendrían mayor energía. Dicha situación provocaría una colisión en el momento en el que el fotón se encuentre con el electrón que se busca medir; este último saldría “expulsado” y se modificaría su momento y posición. Pues bien, en ese instante sería posible saber la posición del electrón en el punto donde sucedió la colisión, sin embargo, debido a la colisión se alteraría su momento. Por otro lado, si se quisiera advertir el momento del electrón se tendría que utilizar una radiación con mucho menor frecuencia, y, por

⁵³ El uso de luz visible no sería lo adecuado, pues su longitud de onda es más amplia que la dimensión del electrón. Es por ello que se tendría que utilizar una radiación con una longitud de onda menor, que esté en correspondencia con la dimensión del electrón.

consiguiente, con mayor longitud de onda, pero de esta manera no se percibiría la posición del electrón. Así, no podríamos obtener con exactitud el valor de ambas magnitudes –posición y momento– para el electrón, donde el límite en la exactitud estará restringido por la constante de Planck, h . Observemos cómo lo expone Heisenberg:

En el instante de tiempo cuando se determina la posición, es decir, en el instante cuando el fotón es dispersado por el electrón, el electrón sufre un cambio discontinuo en el momento. Este cambio es mayor en tanto la longitud de la luz empleada es menor, esto es, la determinación de la posición se vuelve más exacta. En el instante en el que se conoce la posición del electrón, su momento sólo puede ser conocido en magnitudes que correspondan a ese cambio discontinuo; por lo que, si se conoce con mayor precisión la posición, la determinación del impulso será menos precisa, y de manera inversa. (Heisenberg, 1927, p. 174. En Hilgevoord y Uffink, 2014)

Para dar cuenta de lo anterior, Heisenberg representa las relaciones de indeterminación con la siguiente fórmula:

$$\Delta p \cdot \Delta q \geq h \quad ^{54}$$

En esta expresión se indica la indeterminación del valor del momento (p) que al ser multiplicado por la indeterminación de la posición (q) da como resultado un valor mayor o igual a la constante de Planck (h). De esta manera se estaría expresando un límite teórico y físico que es regulado por h , para conocer con precisión la posición y el momento de manera simultánea. En este sentido, la imposibilidad de obtener resultados precisos para ambas magnitudes se genera a causa del límite establecido por la constante de Planck.

Las relaciones de indeterminación pronto fueron consideradas una característica fundamental para la escuela o interpretación de Copenhague, donde comenzaron a ser consideradas como un principio. El primero en darse cuenta de las implicaciones filosóficas que se originaban con este principio fue el propio Heisenberg, pues el concepto de indeterminismo establece un vínculo muy estrecho con la concepción de determinismo causal ampliamente abordado en la historia de la filosofía y que se ha asociado con la ley de causalidad.

Heisenberg señaló que en afirmaciones tales como: “el conocimiento exacto del presente permite calcular el futuro”, basada en la ley de la causalidad, no es la conclusión la que resulta falsa, sino la hipótesis (Jammer, 1974). En otros términos: a partir de la

⁵⁴ Δ , simboliza la indeterminación.

indeterminación o inexactitud de los valores iniciales, asumiendo las relaciones de indeterminación y los resultados probabilísticos se descarta tener una previsibilidad estricta de los acontecimientos futuros. En este sentido, con las relaciones de indeterminación se estaría vulnerando la formulación fuerte de la causalidad. Heisenberg lo dice de la siguiente manera: “Dado que todos los experimentos obedecen a las leyes de la cuántica y, consecuentemente, a las relaciones de indeterminación, el carácter inexacto de la ley de causalidad es definitivamente una consecuencia establecida por la mecánica cuántica en sí misma”. (En: Jammer, 1974)

Cuando se postuló el principio de indeterminismo algunos creían que los resultados obtenidos se debían a la falta de instrumentalización que permitiera hacer mediciones con mayor precisión y que, en un momento dado, los errores irían disminuyendo hasta obtener resultados más precisos. Sin embargo, con el paso de los años y el avance en la experimentación, las relaciones de indeterminismo seguían presentándose. De este modo, el principio de indeterminismo que se postuló desde la interpretación de Copenhague se ha de considerar como un principio epistemológico en el sentido de que refiere hasta qué punto es posible conocer las magnitudes implicadas; por otro lado, también se puede observar como un principio ontológico al reflejar un límite impuesto en la naturaleza del mundo atómico por la constante de Planck. Como se ha mencionado atrás, este principio ontológico representó un disentimiento con lo que se percibe con los elementos a nuestra escala; además, significó una cierta fractura en la concepción de causalidad.

Presentación del “indeterminismo cuántico” a través de textos divulgativos

Como hemos visto, el concepto de indeterminismo abordado desde la física cuántica motivó reflexiones de sentido filosófico con las que se buscaba clarificar cómo se debería interpretar al mundo microscópico.

Ahora bien, en este apartado observaremos cómo se presenta el concepto de indeterminismo a través de los textos divulgativos. Al igual que en la sección anterior, la exposición en este apartado seguirá el orden cronológico en el que aparecieron las publicaciones.

La naturaleza del mundo físico (1928) de Arthur Eddington

Lo primero que hay que distinguir en el texto de Eddington es que en él se expone como principio de indeterminación y no como relaciones de indeterminación. El físico inglés dedica algunos párrafos para exponer el principio, éste lo define en dos ocasiones. La primera es un tanto general, dice: “el principio de indeterminación consiste en que una partícula puede tener colocación o tener velocidad, más de ninguna manera puede tener simultáneamente la una y la otra” (Eddington, 1938, p. 254). La segunda es expresada en lenguaje un poco más técnico: “si q es una coordenada y p el momento correspondiente, la incertidumbre inevitable de nuestro conocimiento de q , multiplicado por la incertidumbre de p , es del orden de la magnitud de la constante h del cuanto” (Ibíd., p. 256).

Además de presentar estas definiciones, Eddington busca precisar en qué consiste y cómo se podría concebir tal principio a partir de la exposición de un ejemplo basado en el experimento mental del microscopio de Heisenberg⁵⁵. Busca, con ello, mostrar cómo esta particularidad actúa al tratar de determinar la posición y el momento de un electrón. Eddington toma como herramienta la descripción un tanto detallada de lo que consiste este experimento mental; sin embargo, no menciona que se trata de un experimento de este tipo, solamente hace suponer la existencia de un “microscopio poderoso” en el que, en un momento dado, se nos presentará un dilema que no se trata de una “dificultad fortuita [...] es la consecuencia de algo así como una confabulación que nos impide ver lo que no existe”. Esta cita se refiere a la posibilidad de ver la posición del electrón en el átomo, pues, según afirma, tal posición es algo que “no existe en la Naturaleza”. (Ibíd., p. 258)

El argumento de Eddington hace referencia a las implicaciones de adoptar el “nuevo” principio para la ciencia en general, en particular para la física; además, presenta las implicaciones que el principio puede ocasionar en la concepción de “volición”. Afirma que hay una correspondencia entre lo que se presupone en dicho principio y la “libertad de la mente y el espíritu humano”, nos dice que “un determinismo completo del universo material no puede divorciarse del determinismo de la mente” (Ibíd., p. 341), pero que, ante

⁵⁵ Cfr. Este experimento se ha descrito en la sección anterior “Transición del supuesto determinista al indeterminismo”.

el principio indeterminista, el cual también podría actuar sobre la mente, ésta última queda “libre”.

No puede haber un control determinista completo de los fenómenos inorgánicos, a menos que el determinismo rijan a la misma mente. De manera recíproca, si queremos emancipar la mente debemos, en cierto modo, emancipar también al mundo material. Parece que ya no hay obstáculo alguno para esa emancipación. (Eddington, 1938, p. 342)

El Universo misterioso (1930) de James Jeans

Otro texto que expone el principio de indeterminación como una característica que se diferencia de los ideales de la física clásica, y que muestra una correlación con ideas referentes al comportamiento humano, es *El Universo misterioso* del físico inglés James Jeans. En la sección titulada “El nuevo mundo de la física moderna”, Jeans se enfoca en presentar los fundamentos de la física cuántica y presenta la idea de indeterminismo. Describe, brevemente, en qué consiste el principio indeterminista de Heisenberg desde la comparación con la expectativa que se tenía en las mediciones de la “vieja ciencia”: en esta última, al conocer “el estado inicial de una partícula, a partir de la posición en el espacio en un instante dado y su velocidad de movimiento a través del espacio en ese mismo instante”, se podría determinar el futuro de esa partícula; así, si se tenían todos los “datos iniciales para todas las partículas del universo, todo el futuro del universo podría predecirse”. No obstante, con la postulación del indeterminismo de Heisenberg parece que “la naturaleza aborrece la exactitud y la precisión sobre todas las cosas”. (James, 1930, p. 23)

Con la nueva física la expectativa de predicción exacta no se cumple. Si se sigue la interpretación de Heisenberg “estos datos son, por naturaleza, inaccesibles. Si se sabe que un electrón está en un cierto punto en el espacio, no se puede especificar con exactitud la velocidad con la que se mueve, que por naturaleza permite un cierto margen de error [...] la naturaleza no conoce nada, aparentemente, sobre medidas exactas”. (Ibíd., p. 23)

Para precisar en qué consiste el principio de indeterminación, Jeans sugiere una analogía a partir de un tipo de linterna antigua de “diapositivas” (*lantern slide*), la cual consiste en un lente y un orificio, en el que se introducían pequeños cristales que tenían alguna imagen o fotografías grabadas; de esta manera, al colocar los cristales se podrían observar las imágenes con claridad a través del lente. Ahora bien, para Jeans, la posición y el movimiento de un electrón podrían corresponder a cada una de las caras de los cristales utilizados en estas linternas. Si este cristal, que contiene la posición y el movimiento, es

colocado en una linterna defectuosa, la “imagen completa” solamente se podrá enfocar de una manera intermedia, donde la observación de la posición y el movimiento del electrón sería de una claridad media. Sin embargo, si el cristal es colocado en una linterna perfecta no podría suceder esto, pues entre más se enfoque en una cara, la otra se volverá más borrosa y se obtendrá una imagen incompleta. En este sentido, la linterna defectuosa correspondería a la vieja ciencia, y la linterna perfecta correspondería a la nueva ciencia, la cual muestra una diferencia con respecto al viejo determinismo.

Con este ejemplo podemos observar que Jeans utiliza una imagen a partir del funcionamiento de un objeto popular –en aquel momento– para la sociedad inglesa y europea, que fue la linterna de diapositivas. Trata de crear una representación accesible para el lector y así, promover el entendimiento del significado del principio de indeterminación.

Ahora bien, después de haber mostrado en qué consiste tal principio desde la referencia hacia Heisenberg y con la analogía presentada, Jeans continua su presentación con su propia apreciación sobre el indeterminismo. Él afirma que la indeterminación expuesta por Heisenberg es una característica de “naturaleza parcialmente subjetiva” que llamó la atención de los físicos, en la que dicha subjetividad se deriva del “hecho que no se puede especificar la posición y velocidad de un electrón con absoluta precisión” a causa de la “torpeza del aparato con el que se experimenta”. (Jeans, 1930, p. 24)

Para James Jeans la falta de una causalidad estricta en la nueva física permite que la conciencia juegue algún papel en los fenómenos. A la idea de conciencia, Jeans le asociaba la noción de libre albedrío. Indicó que a falta de una causalidad o un determinismo en la naturaleza, hay espacio para que con nuestro libre albedrío “se pueda modificar el universo en un grado pequeño a partir de nuestra presencia”, continúa, la “mente puede desempeñar el papel de creador del destino de los átomos”. Sobre esto último, para Jeans la “nueva ciencia” no tiene la capacidad de decir lo contrario: “A través de los átomos de nuestra mente se pueden afectar los movimientos de nuestro cuerpo y el estado del mundo que nos rodea” (ibíd., p. 27). Considerando esto, para el físico inglés las ideas de la nueva física abrían un espacio para discutir sobre el determinismo y el libre albedrío.

Hasta este punto, es posible observar que, en el momento de su publicación, la propuesta de las relaciones de incertidumbre de Heisenberg, y por consiguiente del principio de indeterminismo, tenía poco de haber salido a la luz, por lo que el entendimiento sobre su alcance no mostraba claridad, situación que de alguna manera se

refleja en la exposición de estos dos textos donde los autores trasladan el significado a ámbitos del comportamiento humano. No obstante, apelando a razonamientos desde la comunicación de la ciencia y la divulgación, el hecho de que los autores de los libros, en el momento de la publicación, ya fueran personajes reconocidos tanto en el ámbito de la ciencia, así como por sus colaboraciones para comunicar ciencia, juega un papel importante para considerárseles figuras de autoridad para esparcir conocimiento que pocas veces se pone en duda por parte del público. De esta manera, el entendimiento “correcto” por parte del público queda en función del discurso desarrollado por el autor. Con el giro de significado que los autores realizan en el concepto de indeterminismo se crea una posibilidad de que se origine una malinterpretación de su significado por parte de los lectores.

La física nueva y los cuantos (1937) de Louis de Broglie

En el texto de *La física nueva y los cuantos (1937)* nos enfocaremos en una sección titulada “Las relaciones de Incertidumbre”. En este apartado, el físico francés señala a Heisenberg como el primer físico que llamó la atención sobre las consecuencias que se derivaban de la interpretación física de la nueva mecánica, “consecuencias que se expresan matemáticamente por las relaciones de incertidumbre, y que se fundamentan en la no conmutabilidad de la mecánica matricial” que el mismo Heisenberg había propuesto.

Cabe señalar que De Broglie indica en su introducción que la lectura del libro deberá seguir el orden del capitulado, pues el contenido siempre mostrará alguna relación con lo que se haya expuesto anteriormente. Por esta situación encontraremos que en dicha exposición muchas veces se presentan conceptos o términos que en una primera lectura podrán resultar extraños para quienes no están relacionados con la teoría; sin embargo, la comprensión será la correcta si se ha seguido la lectura de las secciones previas. Además, De Broglie advierte que la estrategia que él aplica en el desarrollo de su discurso para favorecer el entendimiento del lector sobre los principios de la física cuántica es dar una exposición de una manera cualitativa, “para hacerlo más fácilmente comprensible”. En este sentido, la manera en la que De Broglie introduce en qué consisten las relaciones de incertidumbre es la siguiente:

Las relaciones de incertidumbre son una consecuencia necesaria: de la posibilidad de hacer corresponder al estado de un corpúsculo una cierta onda asociada por una parte, y de los principios generales de interpretación probabilística por la otra [...] Ninguna medida podrá conducir a conocer la posición y el movimiento de un corpúsculo con más precisión de lo que permiten las relaciones de incertidumbre, lo que evidenciará la imposibilidad de poder siempre representar el estado de un corpúsculo por una cierta onda asociada. (De Broglie, 1941, p. 218).

De Broglie busca detallar por qué la experiencia no puede suministrar más precisión de lo que suponen las relaciones de incertidumbre; para ello presenta un ejemplo que, al igual que en la exposición de Eddington, está basado en esencia en el experimento mental del microscopio de Heisenberg, aunque De Broglie no hace ninguna referencia para indicar si este experimento está basado en la propuesta de Heisenberg. Independientemente de ello, en el experimento que describe se busca medir un “corpúsculo” a partir rayos de luz que tienen la característica de poder modificar su longitud de onda, según la precisión que se requiera⁵⁶.

Al haber mostrado los ejemplos “convincientes”, De Broglie realiza la siguiente afirmación: “parece que hoy la mayoría de los físicos admiten la imposibilidad de encontrar un dispositivo de medida que permita infringir las prohibiciones de las desigualdades de Heisenberg”. Con esto, De Broglie alude de manera implícita a la disconformidad que se generó frente a la propuesta de Heisenberg, aunque, según él, el valor significativo que tales desacuerdos pudieran tener se desvanece al haber un acuerdo en la “mayoría”.

Posteriormente, De Broglie se dedica a presentar los aspectos filosóficos de las relaciones de incertidumbre consideradas como un principio para la teoría cuántica, sin embargo, puntualiza que su interés es enfocarse en la filosofía intrínseca en la interpretación probabilística. Para mostrar la polémica filosófica del indeterminismo, De Broglie presenta las diferencias con el determinismo establecido en la física clásica; recordemos que esta manera de proceder también se observó en los trabajos de Eddington y James Jeans. De Broglie señala:

[...] Toda la física teórica clásica descansaba sobre ecuaciones diferenciales ordinarias, o en derivadas parciales que permitían calcular rigurosamente la evolución de un sistema físico cualquiera a partir de ciertos datos sobre el estado inicial [...] los fenómenos elementales obedecían a un determinismo riguroso [...] el determinismo se había convertido en una especie de dogma científico [...] Pero, en el estudio microscópico de los fenómenos físicos, la

⁵⁶ Cfr. En la sección “Transición del supuesto determinista al indeterminismo”, en donde se describe el experimento mental *Microscopio de Heisenberg*.

importancia de las incertidumbres será considerable y suficiente para impedir una completa descripción del curso de los acontecimientos conforme a las exigencias del determinismo. (De Broglie, 1941, p. 223)

Dicho esto, De Broglie expone el alcance del principio de indeterminación para la idea de relación causal; él indica que a partir de las mediciones se provocan perturbaciones en el sistema cuántico, lo que imposibilita establecer las relaciones causales entre el estado inicial y el estado posterior.

El significado filosófico que De Broglie advierte sobre el indeterminismo se deriva de la oposición que representó éste para el ideal de determinismo de la física clásica. No obstante, deja claro que esto no significa que el determinismo se haya anulado por completo, sino que el conocimiento de los fenómenos a escala microscópica no se puede fundamentar en él, pues los resultados que se obtienen son de orden probabilístico.

Con respecto a ello, el autor hace un señalamiento, sin ser específico, a quienes no aceptaron al indeterminismo y que llegaron a decir que “una ciencia no determinista es inconcebible”; así pues, indica que esa postura es “exagerada puesto que la física cuántica existe y es indeterminista”, lo cual hace parecer “perfectamente ocioso pensar que la física volverá un día u otro a las sendas del determinismo”.

Para este físico francés, la imposibilidad de seguir la causalidad en el mundo microscópico se debe posiblemente al “empleo de conceptos tales como los de corpúsculo, espacio, tiempo, etc.”, conceptos que remiten a experiencias en nuestra escala pero que no se tiene la seguridad de que tales conceptos estén “adaptados a la representación de la realidad”. En este sentido, se puede observar que traslada la discusión a otro ámbito en donde tendrían que considerarse aspectos del lenguaje, no obstante, De Broglie no argumenta al respecto.

La evolución de la física (1938) de Albert Einstein y Leopold Infeld

Al momento de la publicación, Einstein ya era conocido mundialmente, tanto en el campo de la ciencia como dentro de la sociedad, por lo que cualquier aportación que Einstein realizara sería observada por la comunidad. Así sucedió con este texto, pues es uno de los trabajos divulgativos que más éxito tuvo, y fue traducido a varios idiomas.

En el último capítulo del libro, “Los cuantos”, los autores presentan la teoría de los cuantos. Al igual que los anteriores escritos, los autores señalan la diferencia que se percibió entre la física clásica y la física cuántica sobre la “imposibilidad de una descripción del movimiento de una partícula elemental en el espacio y en el tiempo”, situación que sí se daba en la física clásica. Einstein e Infeld dicen:

La física cuántica abandona las leyes individuales de partículas elementales y establece directamente las leyes estadísticas que rigen los conjuntos numerosos. Es imposible, basándose en la física cuántica, describir las posiciones y las velocidades de una partícula elemental o predecir su trayectoria futura como en la física clásica. La física cuántica vale sólo para grandes multitudes y no para cada uno de sus componentes individuales. No es la pura especulación ni el deseo de novedades, sino la dura necesidad la que forzó a los físicos a modificar el punto de vista clásico. (Einstein, A., Infeld, 1993, p. 230)

En todo el capítulo nunca se hace una referencia directa al principio de indeterminación y mucho menos a la aportación de Heisenberg al respecto. Solamente indican que las “características fundamentales de las ecuaciones que constituyen la expresión matemática” de la teoría se deben a los trabajos de Bohr, De Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Dirac y Born. La presentación muestra en qué consiste la función de onda de probabilidad, la cual califican como “la base de nuestro conocimiento de los sistemas cuánticos y permite dar respuesta a todo problema de naturaleza estadística referente a tales sistemas”. Después de presentar a la onda de probabilidad, se reitera que dicha función no permite obtener resultados exactos para la posición y la velocidad de un electrón en un lugar determinado, pues esto “no tiene sentido en la física cuántica”; dado que los resultados que se obtienen en la física cuántica para encontrar el electrón en un lugar determinado son de orden probabilístico.

La importancia filosófica de la física cuántica, de acuerdo con los autores, reside en que esta teoría representó una brecha que se aleja de la clásica concepción mecanicista, y el retorno a ese punto de vista “parece, hoy más que nunca, improbable”. Al asumir que las teorías físicas “tratan de dar una imagen de la realidad y de establecer su relación con el amplio mundo de las impresiones sensoriales” en la física cuántica, la imagen que se refleja es distinta a la de la física clásica, donde la discontinuidad reemplazó a la continuidad, y en lugar de leyes aplicables para objetos individuales, se considerarán leyes de probabilidad para una mayor cantidad de objetos. De esta manera, nos dicen, la ciencia nos está mostrando una “realidad distinta” a la acostumbrada. Ante esto, resaltan que, para el proceder de la ciencia, es necesaria la creencia de que es “posible alcanzar la

realidad con las construcciones teóricas” y, también, creer “en la armonía interior de nuestro mundo”.

Con estas afirmaciones es posible notar la tendencia de pensamiento de los autores, o al menos seguir la línea de pensamiento de Einstein ante las nuevas ideas que se presentaron con la física cuántica. La exposición en esta publicación está cargada de referencias sobre cómo van surgiendo las ideas en las ciencias y cómo éstas, en un momento dado, sufren modificaciones que permiten cambiar la interpretación de la naturaleza, lo que pone en claro que el proceder de la ciencia es maleable, pues ésta “no es, ni será jamás, un libro terminado”. Esto cobra importancia en un texto divulgativo, ya que se presenta al público el proceder más “natural” de la ciencia y no refleja una idea de ésta como una actividad perfecta carente de dudas.

“Snooker cuántico” (1940) y *Biografía de la física* (1961) de George Gamow

En “Snooker cuántico”, como ya mencionamos en secciones anteriores⁵⁷, el personaje principal asiste a una conferencia impartida por un profesor de física, en el que la temática es precisamente la física cuántica, y en ella el profesor explica el principio de indeterminación.

La manera de exponer al lector este principio es aludir al significado que tiene la noción de “movimiento” y su relación con el significado de “trayectoria” dentro de la física clásica. Después, Gamow, a través del profesor, relaciona el concepto de movimiento, percibido desde la física clásica, con el movimiento que tendrían las partículas a una escala microscópica. Para ello, el profesor de física invita a su público, los asistentes a la conferencia, a imaginar una situación en la que se busca detectar la trayectoria de alguna partícula. El ejemplo que Gamow propone es en esencia el experimento mental del microscopio de Heisenberg, aunque él no hace mención del autor de ese ejercicio de imaginación. La forma de presentar ese ejemplo es la siguiente:

[...] imaginemos que una científica cuenta con un aparato sensible con el cual intenta seguir el movimiento de un pequeño cuerpo material [...] Ella decide hacer sus observaciones “mirando” cómo se mueve el cuerpo. Por supuesto, lo tiene que iluminar para que sea posible verlo.

⁵⁷ Cfr. En la sección dedicada a “Snooker cuántico” dentro de 2.1 “Representación del comportamiento dual de los componentes mínimos de la materia en la física cuántica a través de textos divulgativos”.

Sabiendo que, en general, la luz ejerce cierta presión sobre los cuerpos y al hacerlo puede alterar su movimiento, decide usar una iluminación a base de breves destellos que sólo se encenderán en los momentos en que ella realice sus observaciones. En el primer ensayo desea observar sólo 10 puntos de la trayectoria, para lo cual elige una fuente luminosa tan débil que el efecto integral de la presión de la luz durante 10 iluminaciones sucesivas se encuentre dentro de la gama de precisión que necesita. De esta manera, haciendo destellar su luz 10 veces durante la caída del cuerpo, obtiene 10 puntos de la trayectoria con la precisión deseada. Cuando ella deseó mejorar el experimento para obtener un trazo más preciso de la trayectoria, usó 100 puntos de observación. Sabiendo que 100 destellos sucesivos alterarían demasiado el movimiento, al preparar la segunda serie de observaciones eligió una lámpara 10 veces menos intensa [...] Procediendo de este modo y reduciendo constantemente la intensidad de la iluminación, ella logró obtener todos los puntos de observación que deseaba [...] Este procedimiento, muy idealizado pero factible en principio, representa la forma lógica más estricta de construir el movimiento de una trayectoria observando el cuerpo en movimiento [...] Desde la física clásica, todo esto se encuentra dentro de lo posible. (Gamow, 2009, pp. 138-140)

Inmediatamente después de haber expuesto la anterior cita, Gamow decide introducir las limitaciones cuánticas a dicho ejemplo. Expresa que a la experimentadora le será imposible continuar aplicando el sistema que se describió anteriormente cuando llegue a un nivel de iluminación por debajo del equivalente de un fotón por destello. Para dar un argumento más extenso sobre esto, advierte de la imposibilidad de observar al incrementar la longitud de onda utilizada en la luz:

[...] Es bien sabido que cuando se utiliza luz de cierta longitud de onda no es posible ver detalles más pequeños que dicha longitud [...] Al usar ondas cada vez más grandes, ella perderá la precisión en cada uno de los puntos observados y pronto llegará a una etapa en la que cada estimación tendrá un grado de incertidumbre tan grande como el tamaño de su laboratorio [...] Por lo tanto, nunca podrá obtener una trayectoria con la exactitud de la línea matemática como la que solían obtener sus colegas en la física clásica. [...] Cualquier sistema de medición [...] desembocará en el mismo resultado, la posición precisa y la trayectoria exacta no son determinables en un mundo sometido a las leyes cuánticas. (Gamow, 2009, p. 141)

Con esto último se hace notar, a grandes rasgos, en qué consiste el principio de indeterminación. Como hemos mencionado, Gamow alude a la distinción entre las mediciones que se realizan a partir de la física clásica y las que se realizan con los sistemas cuánticos. No obstante, no se percibe las implicaciones filosóficas de asumir el indeterminismo como principio en la naturaleza del mundo microscópico.

Ahora pasemos al libro *Biografía de la Física* (1961). El formato de este texto es distinto a los cuentos del Señor Tompkins; aquí Gamow se propone hacer un recorrido histórico sobre los “eventos” representativos en la historia de la física, mostrando el

proceso del cambio de ideas que se manifiesta en el desarrollo de las teorías, involucrando a los físicos que contribuyen a ese desarrollo.

Para presentar la idea de indeterminismo Gamow hace la pregunta “¿cómo las leyes cuánticas que introducen las cantidades mínimas de energía radiante y energía mecánica afectan las nociones básicas de la mecánica clásica?”. Pues bien, de acuerdo con él, fue ésta la pregunta que se planteó Heisenberg y que le permitió llegar a la raíz de la cuestión, lo que a su vez lo llevó a observar las implicaciones de “aplicar las normas y métodos ordinarios de observación a fenómenos en la escala atómica”. Para mostrar la diferencia entre la medición a nuestra escala y la escala atómica, menciona dos ejemplos cotidianos que permiten dar cuenta del papel que juega la perturbación en cada uno de los casos, lo cual evidencia que en el mundo de las partículas la perturbación es mayor, “por lo que no se puede garantizar que los resultados de la medición describan efectivamente lo que habría ocurrido antes de la medición”. En este sentido, Gamow afirma que tanto el observador como el instrumento de medida intervienen de manera significativa en el fenómeno que se estudia.

Al afirmar lo anterior, Gamow, al igual que en “Snooker cuántico”, utiliza el experimento mental del microscopio de Heisenberg, pero lo ajusta de acuerdo con su exposición. En su propia versión del experimento concluye que en “cuanto más larga la onda de luz, menos seremos capaces de determinar el objeto a causa del efecto de difracción. Así pues, no podemos encontrar la posición exacta del electrón en un instante dado” (Gamow, 2010, p. 333). Más adelante Gamow utiliza otro experimento ideal, pero en esta ocasión las mediciones se harán con una cámara de niebla, esto con la intención de reiterar que el indeterminismo se sigue presentando aun cuando se consideren otras estructuras experimentales. “¿Dónde nos deja esto?”, se pregunta Gamow, “Heisenberg concluyó que en el nivel atómico debemos renunciar a la idea de que la trayectoria de un objeto es una línea matemática”.

Gamow continúa con su discurso para mostrar el papel que juega la probabilidad en la detección de la posición o trayectoria de un electrón. A partir de un ejemplo, muestra la diferencia entre la concepción de probabilidad en la vida diaria, tal como sucede en un juego de póker: si se conoce “cómo están dispuestas las cartas se podría predecir si resultará en un póker de reyes o no”, pero en el mundo atómico “el principio de incertidumbre quita la tierra por debajo de esta idea”, esto es, esa idea de probabilidad no

puede ser aplicada, pues “de entrada nunca conocemos exactamente las condiciones iniciales”.

En el discurso de Gamow hay referencias sobre el significado filosófico que representó el principio de indeterminación, por reclamar un “cambio profundo en nuestras ideas sobre el mundo material”; así mismo, menciona que las relaciones de indeterminación no se aceptaron como principio y expone la postura de Einstein frente a esto. Además de presentar el argumento que seguía Einstein para mantenerse inconforme, Gamow refiere el sexto Congreso de Solvay en 1930 en el que surgieron discusiones al respecto entre Einstein y Bohr-Heisenberg. De acuerdo con Gamow, Einstein aceptó que la propuesta de Bohr-Heisenberg estaba libre de contradicciones internas, pero años más tarde “Einstein expresó la esperanza de que los físicos volverían al punto determinista”. Estas referencias son importantes al intentar mostrar las discusiones fundamentales de la física cuántica, pues se muestra la incompatibilidad de ideas y los cuestionamientos que surgen con respecto a una interpretación dada. A pesar de que no se profundiza en ello se descubre, en cierto sentido, los debates filosóficos alrededor de la teoría.

El carácter de la ley física (1965) de Richard Feynman

Ahora nos remitiremos a *El carácter de la ley física (1965)* a su apartado titulado “Probabilidad e incertidumbre. La visión de la naturaleza a través de la mecánica cuántica”. Como vimos en el apartado dedicado a esta publicación en la sección 2.1 “Representación del comportamiento dual de los componentes mínimos de la materia en la física cuántica a través de textos divulgativos” de esta tesis, Feynman puntualiza que la experimentación en la ciencia es una herramienta fundamental que permite aumentar el poder explicativo y al mismo tiempo el entendimiento, lo que posibilita ampliar nuestra visión del mundo. Con esto en mente, Feynman describe y explica el experimento de la doble rendija para mostrar las características esenciales que se presentan en los fenómenos cuánticos. En lo que respecta a la descripción que da sobre el principio de incertidumbre, él nos dice:

Heisenberg, uno de los padres de la mecánica cuántica, observó que las nuevas leyes de la naturaleza que acababa de descubrir sólo podían ser mutuamente consistentes si existía algún tipo de limitación básica en nuestras capacidades experimentales que no había sido previamente reconocida. En otras palabras, los procedimientos experimentales no pueden ser tan precisos como se quiera. Éste es el principio de incertidumbre de Heisenberg [...] Es

imposible predecir, a partir de cualquier información previa, por qué agujero pasará o lo veremos pasar (aludiendo al experimento de la doble rendija). Esto significa que, en cierto sentido, la física ha tirado la toalla, si es que su propósito original era –y todo el mundo lo creía así– saber lo suficiente para, dadas unas circunstancias, poder predecir lo que ocurriría a continuación (Feynman, 2005, p. 158).

La postulación del principio de incertidumbre de Heisenberg por parte de Feynman se presenta de manera muy breve; sin embargo, él busca hacerlo evidente a partir de la explicación del experimento de la doble rendija⁵⁸. Para Feynman, el indeterminismo no se trata de un postulado epistemológico, de forma que “no es la ignorancia de los mecanismos internos y sus innumerables complicaciones lo que hace que la naturaleza parezca tener carácter probabilístico. Parece ser algo intrínseco”, es decir, se trataría de una cuestión ontológica, aunque Feynman no lo haya expresado en estos términos.

El Tao de la física (1975) de Fritjof Capra

Por último, observemos cómo Capra aborda el concepto de indeterminismo en *El tao de la física*. De manera similar a los textos anteriormente señalados, Capra indica que el principio de indeterminismo impide “conocer la posición de la partícula y su momento de manera simultánea y con precisión”. Además, destaca que tal limitación no “tiene nada que ver con lo imperfecto de las técnicas de medición”, sino que se trata de una “limitación inherente a la realidad atómica”.

Más tarde, Capra indica que en la física atómica el científico “no puede jugar el papel de un observador imparcial objetivo, sino que se ve involucrado e inmerso en el mundo que observa”, es decir, en el sistema atómico, situación que provocaría una “influencia [del científico] en las propiedades de los objetos observados”. Tras esta advertencia alude a John Wheeler, para quien el involucramiento del observador constituye la “característica más destacable de la teoría cuántica”, y propone reemplazar el término de “observador” por el de “partícipe”. Al haber dicho lo anterior, procede con introducir el papel que tiene la observación en el conocimiento místico, pues en este último se “requiere la plena participación de todo nuestro ser”, hasta el punto en el que el “observador y lo observado, el sujeto y el objeto, no sólo son inseparables, sino que llegan a hacerse indistinguibles”. (Capra, 2012, pp. 192-193)

⁵⁸ Cfr. APÉNDICE C, en él se encuentra la transcripción del *experimento de la doble rendija* que Feynman presenta en su texto.

De esta manera, Capra introduce una relación que va desde la propuesta de Heisenberg hasta indicar cómo la teoría atómica se “vincula” con ideales místicos orientales. Continúa su discurso con la siguiente declaración: “La teoría cuántica ha abolido el concepto de objetos básicos y separados, ha introducido el concepto de partícipe para reemplazar el de observador, y puede que hasta incluso crea necesario incluir la conciencia humana en su descripción del mundo”. (Capra, 2012, p. 195)

Lo que es importante destacar hasta aquí es que afirmaciones como ésta son encontradas con facilidad en el texto de Capra; las presentaciones de las características básicas de la física cuántica sí muestran, en esencia, el significado que se le otorga desde la Interpretación de Copenhague. No obstante, el autor no indica explícitamente el límite que la teoría tiene en sus explicaciones, circunstancia que tiene como consecuencia la promoción, a través de la divulgación, de ideas pseudocientíficas. Este tipo de ideas se desarrollarán en el tercer capítulo de esta tesis.

Comentarios sobre la representación del “indeterminismo cuántico” y sus implicaciones filosóficas en la divulgación

Tras haber observado cómo la exposición del indeterminismo se fue presentando a través de varias publicaciones divulgativas, lo primero que se puede advertir es que la concepción de indeterminismo en los primeros años se mostraba como una particularidad que produjo asombro y, en cierta medida, un sentimiento de escepticismo dentro del círculo de físicos que trabajaban en el área de la física cuántica; asombro que se refleja con mayor claridad en los primeros textos divulgativos: en *La naturaleza del mundo físico* de Eddington y *El Universo misterioso* de James Jeans.

No obstante, esto no significa que la actitud de asombro no se percibiera en posteriores publicaciones, sino que solamente varía en la exaltación que imprime cada uno de los autores y, por supuesto, varía debido a los cambios que se fueron percibiendo dentro de la física cuántica en aquella época.

En las primeras publicaciones divulgativas se observó que las afirmaciones a veces iban acompañadas de suposiciones e interpretaciones personales de cada uno de los autores, mientras que en publicaciones más recientes las interpretaciones personales se van perdiendo y se alude a los experimentos que confirmaban el carácter indeterminista en los sistemas cuánticos. En este sentido, a través de las exposiciones divulgativas

observamos una transición que va de posturas idealistas, y en ocasiones escépticas, hacia posturas instrumentalistas y determinantes.

El experimento mental al que se aludía implícitamente y de manera reiterada en la mayoría de las publicaciones elegidas fue el microscopio de Heisenberg. Éste se tomó como punto de partida para exponer, en primera instancia, el papel que juega la disposición de los experimentos para obtener una medición, y por consiguiente, para exponer el argumento del principio de indeterminación. Este experimento ha sido referido y descrito con diversas variaciones, cada autor le imprime su propio estilo y creatividad; por ejemplo, Eddington (1929, p. 257) lo presenta de una manera sintetizada, mientras que Jeans y Gamow (2009, 2010) adoptan una exposición más gráfica.

En lo que respecta a la presentación de la polémica o controversia que representó la postulación de Heisenberg de las relaciones de indeterminación o el principio de indeterminación, se puede observar que la mayoría de los textos presentaron, en mayor o menor medida, las implicaciones de dicho postulado. Sobre esto, los textos que hicieron referencias directas respecto a la reflexión filosófica intrínseca fueron los de Eddington, James Jeans, aunque ambos mostraban una interpretación muy personal, Louis De Broglie, Albert Einstein y Leopold Infeld, y Gamow en *Biografía de la física*. En la publicación de Feynman y en el cuento “Snooker cuántico” de Gamow se hacen alusiones sutiles, pero no se desarrollan las ideas. Además, es importante señalar que en cada una de las presentaciones se distinguió algún comentario desde la postura personal del autor.

Esto último es importante dentro de la divulgación, pues el papel que juegan los autores frente al público, muchas veces o en su totalidad, es de figura de autoridad, por lo que las afirmaciones realizadas podrían influir en gran medida en cómo los lectores acogen la información. Es relevante señalar lo anterior, pues en todos los textos elegidos del presente estudio los autores son físicos que fueron públicamente reconocidos en el momento en el que se publicaron sus escritos.

Ahora bien, veamos con mayor detalle las características destacables de la forma de divulgar de los autores.

En el caso de los textos divulgativos pertenecientes a Eddington y James Jeans, ambos físicos del Reino Unido y figuras reconocidas en el área de la física, así como por su trabajo para divulgar la ciencia en ese país, exponen la idea del indeterminismo cuántico desde la postura en la que se encontraba la propia física cuántica en ese momento. También muestran de manera general las cuestiones que aparecieron en sentido filosófico, para lo

cual refieren principalmente el desconcierto que ocasionó en la comunidad de científicos la nueva física con respecto a la física clásica de Newton, haciendo énfasis en la necesidad de reevaluar los ideales que ya se tenían y que correspondían con la intuición.

Por otro lado, para ellos la filosofía está presente en el indeterminismo postulado por Heisenberg, dado que se puede crear un vínculo con elementos que van más allá del comportamiento de las partículas, apuntando hacia nociones referentes a la conducta del ser humano o, en términos de Eddington, a “aspectos más amplios de la naturaleza humana”. Para este autor, independientemente de la ruptura que se vio con el determinismo, el indeterminismo de la cuántica representó una relación con el concepto de “volición”; en cambio, James Jeans hace un vínculo entre indeterminismo y “libre albedrío”.

Para Eddington, la teoría física se limitaba por la estructura de los procesos mentales (1929, p. 243), en este sentido, sería un fundamento mental lo que se encontraría en la base de todo, situación de la que la ciencia física no podría dar cuenta y resultaría ser un problema en donde tuviera lugar la fe.

Cuando ambos autores, James Jeans y Eddington, aluden a la relación de indeterminismo con la volición o el libre albedrío, no se observa alguna restricción clara entre el alcance de la teoría y sus propias creencias personales; al presentarse tal situación en un texto divulgativo se podría generar un entendimiento erróneo en los lectores sobre lo que corresponde estrictamente al principio de indeterminismo y aquello que es sólo una extensión derivada del pensamiento personal del autor.

Por otra parte, a pesar de las reiteradas observaciones que hace Eddington sobre el vínculo que se presenta entre la “nueva teoría”, como él la llama, y el papel de la filosofía en búsqueda del entendimiento de sus principios, el autor de vez en cuando hace afirmaciones que podrían poner en duda el papel de la filosofía dentro de la física cuántica. En su introducción, menciona que en el texto se considerarán “aquellos resultados del estudio moderno del mundo físico que ofrecen mayores perspectivas al pensamiento filosófico” (1929, p. 20). Siguiendo esta idea, a través del texto se hacen referencias a la importancia que representaron las nuevas ideas que surgieron a partir de la cuántica, pues se consideraban ideas revolucionarias para la ciencia, además, se muestra la necesidad de llegar a acuerdos para otorgar alguna interpretación de “la parte matemática”; sin embargo, señala que, debido a la naturaleza del escrito, por ser “público”, no abordará el contenido matemático y se dedicará a presentar el aspecto filosófico. A pesar de estas

aseveraciones, más adelante Eddington hace una analogía en la que la física cuántica es como entrar a otra puerta, en la que se debería de clavar un anuncio con las siguientes palabras: “reparaciones estructurales en curso; prohibido la entrada excepto para necesidades del servicio”, y señala que en esta puerta no se debería permitir que los filósofos se acercasen, pues de la participación de la filosofía en la física cuántica resultaría algo “improductivo y erróneo” (Ibíd., p. 244).

Frente a estas declaraciones se puede percibir una discordancia en el discurso de Eddington sobre la tarea de la filosofía en el proceder de la ciencia, y en específico en los fundamentos de la cuántica. Al no dar mayor explicación con respecto al rechazo de la filosofía queda un hueco que podría ocasionar dudas en los lectores principiantes, o bien, influir en el rechazo que éstos podrían tener ante la relación entre ambas disciplinas. De nuevo, es importante volver a aludir al papel que juegan los autores de la divulgación como figuras de autoridad frente al público, que, en su mayoría, acepta sin cuestionar lo que se expone en el texto.

Otro aspecto por considerar es el tipo de lenguaje y la estructura expositiva de ambos autores; en éstos se detectan algunas diferencias significativas en el proceso de comunicar la ciencia. Como primer señalamiento, James Jeans tiende a utilizar un lenguaje más natural que propiciaría una lectura más fluida en comparación con el escrito de Eddington, pues este último, a pesar de que en su introducción indicó que no presentaría formulaciones matemáticas, describe las formulaciones en el interior del discurso. Con James Jeans hay un mayor uso de herramientas de lenguaje, como analogías o metáforas, que permiten crear representaciones para los lectores y con ello mejorar la comprensión de lo expuesto.

Por otro lado, en ambos autores se sigue un orden cronológico en la exposición, donde hay, en cierto grado, una narrativa implícita, herramienta de importancia para la divulgación, pues permite seguir una historia dada y no solamente la presentación de información. De este modo, en la exposición de estos textos se sigue una secuencia que está en función de la historia de la propia física cuántica, en donde los personajes de esa historia son los físicos fundadores de la teoría.

Debido a dichas relaciones que se expresan en estas primeras exposiciones divulgativas, de Eddington y Jeans, se podría afirmar que en cierto sentido poseen un germen del tipo de divulgación en donde las características de la física cuántica se

relacionan con aspectos de la conciencia o la mente, vínculo que se ha expuesto en mayor medida en publicaciones divulgativas que aparecieron a partir de la década de los setenta⁵⁹.

Ahora, observemos el texto de Louis de Broglie y el de Albert Einstein en coautoría con Leopold Infeld. Al retomar el texto de De Broglie, se puede observar que su exposición está cargada de términos propios de la teoría y de la física en general, además de que continuamente remite a lo que se “había mencionado anteriormente”. Con esto cumple su señalamiento de que la lectura deberá seguir una continuidad con el fin de comprender el escrito en su totalidad. También es posible observar esta advertencia en *La evolución de la física* de Einstein e Infeld, pues ambos textos están estructurados a partir de la historia de la física, por lo que siguen la secuencia cronológica de los cambios que se fueron presentando y cubren el origen y desarrollo de la física cuántica.

A pesar de lo anterior es posible detectar diferencias entre ambos textos. En primera instancia podemos aludir al lenguaje empleado. Louis de Broglie utiliza formulaciones y el lenguaje científico, por lo que el público ideal para ese texto no podría considerarse como un público amplio, sino que serían aquellas personas que cuenten con algunas nociones en el ámbito de la física. Por su parte, Einstein e Infeld presentan su discurso divulgativo con un lenguaje asequible para cualquier lector. Ambos utilizan herramientas para promover un mejor entendimiento en el lector, ya sea por medio de ejemplos, ampliando las descripciones o introduciendo metáforas o *analogías*, pero el uso de esas herramientas, al estar ligadas con el nivel de lenguaje utilizado, muestra una relación directa con el público que podría acercarse y comprender la información.

Comparemos ahora la representación que los autores hacen respecto a los debates fundamentales de la cuántica. Para ello, es importante considerar que hubo momentos en la historia de la física cuántica que tanto De Broglie como Einstein expresaron disconformidades frente a la interpretación predominante. Por su parte, Louis de Broglie en sus primeros trabajos trató de construir una teoría determinista para explicar su propuesta sobre la dualidad onda-partícula, pero después del Congreso de Solvay de 1927 pasó a ser discípulo de la escuela de Copenhague. No obstante, alrededor de 1952 volvió a la creencia de una descripción causal de la naturaleza. (Cushing, 2003, p. 321)

En este sentido, en el momento en el que se publicó *La física nueva y los cuantos* (1937), la postura de De Broglie se refleja en algunas líneas dentro de su discurso, en donde

⁵⁹ Cfr. CAPÍTULO 3 “Alcances y dificultades al transmitir la fundamentación conceptual de la física cuántica”.

respalda lo que se establece desde la Interpretación de Copenhague. Menciona que la teoría es “adoptada por todos, [incluyendo] aquellos que la creen provisoria y que no han renunciado a la esperanza de volver un día a concepciones más clásicas”. Más adelante vuelve a referirse a quienes no aceptan el indeterminismo como característica esencial de la cuántica y considera tal posición “exagerada”, puesto que “la física cuántica existe y es indeterminista”, por lo que le parece “ocioso pensar que la física volverá un día u otro a las sendas del determinismo”.

En lo que respecta a la exposición de Einstein e Infeld, cuando hablan sobre la imposibilidad de describir posiciones y velocidades de una partícula, solamente aluden a la “necesidad” en la ciencia “de cambiar los puntos de vista” en el intento de comprender la realidad; con ello, han de hacer referencia a un cambio en el punto de vista personal. Después afirman que intentar volver a una concepción de la física al estilo clásico es algo que se “aleja” y es “improbable”. Por otro lado, aluden sutilmente a que en la física cuántica hay dificultades por las que se “espera impacientemente su solución”, pero que no se puede “prever cuándo y dónde se hará la clarificación de dichas dificultades”; no obstante, no señalan cuáles son dichas dificultades. Con estos pequeños pasajes se vislumbra que Einstein e Infeld dan luz al lector respecto a los desacuerdos sobre una teoría cuántica acabada y también presentan, de cierta manera, el proceder de la ciencia, del cual no podría decirse que tiene un camino recto.

Ahora bien, retomando los textos elaborados por George Gamow: el cuento “Snooker cuántico” y “Relaciones de incertidumbre” en *Biografía de la física*. Entre estas dos exposiciones se presentan visibles diferencias en el discurso y en el nivel de lenguaje utilizado. Por una parte, en la recopilación de cuentos se indica que todos ellos, incluyendo el de “Snooker cuántico”, están dirigidos a un público amplio, es decir, que se considera que cualquier interesado en el tema podrá leer y comprender el contenido a cierto nivel. Sin embargo, en “Relaciones de incertidumbre” Gamow indica que el propósito final de dicho texto es que “sirva para que los jóvenes lectores sientan el impulso de estudiar física”. Al advertir estas consideraciones es notable que la exposición tiene variaciones, las cuales podemos observar al remitirnos a la sección anterior⁶⁰. Como se ha señalado, Gamow expresa con mayor claridad la importancia que tuvo el principio de indeterminación en el

⁶⁰ La sección donde se visualiza el tipo de exposición en cada una de las exposiciones sobre indeterminismo es “Presentación de la concepción de indeterminismo cuántico a través de textos divulgativos”.

entendimiento de la naturaleza dentro de su texto *Biografía de la Física*. Cabe destacar que los trabajos de Gamow, al menos los que fueron retomados en este estudio, vistos desde la comunicación de la ciencia, utilizan varias herramientas de la divulgación, como ejemplos que remiten a la vida cotidiana, metáforas, analogías, descripciones y un nivel de lenguaje apropiado para que un amplio rango de lectores comprenda las ideas esenciales.

En la exposición de Feynman también es posible observar que su procedimiento para presentar las ideas esenciales del indeterminismo es a partir de la descripción detallada de un experimento; éste elige presentar el experimento de la doble rendija. Además, dado el lenguaje utilizado por el autor, la dificultad que pudiera surgir por seguir la descripción es mínima. En este sentido, el entendimiento que podría generar en el lector es factible. Tal como hemos dicho, el interés de Feynman por mostrar el principio indeterminista se centra en afirmar su realidad en los fenómenos cuánticos, además de presentar el proceder de la ciencia; sin embargo, Feynman resta importancia a las cuestiones filosóficas implícitas en la teoría. En este sentido, en su texto no se presentan las controversias que surgieron al postular el indeterminismo.

Por último, tenemos el texto de Fritjof Capra. Éste es un caso clave para abordar la divulgación de la física cuántica y la relación que se ha impuesto con nociones fuera del alcance de la teoría. La forma en que Capra presenta la cuántica es similar a las anteriores publicaciones: utiliza un lenguaje claro y no un lenguaje científico, además de analogías, metáforas y ejemplos. No obstante, la gran diferencia con los demás textos aquí presentados radica en que su argumentación siempre muestra vínculos con aspectos místicos, lo que él hace es hacer relaciones entre la física cuántica y lo que él llama “filosofía oriental”, por lo que no llega a mostrar las cuestiones sobre la fundamentación e interpretación física que surgen desde la filosofía de la física cuántica. Considerar este texto en este estudio cobra importancia por los alcances que ha tenido y porque en la actualidad siguen surgiendo publicaciones similares.

2.3

Representación del papel del observador y los instrumentos de medición a través de textos divulgativos

Debido al alcance predictivo con el que cuenta y a la gran exactitud de su verificación experimental, la física cuántica es una de las teorías más exitosas en la historia de la ciencia. Como producto de esta teoría se ha desarrollado tecnología con la que hoy en día convivimos en nuestra vida diaria. Sólo por mencionar un par: los transistores y los láseres; los primeros necesarios para el funcionamiento de los aparatos electrónicos tales como los celulares o computadoras; los segundos también se encuentran en dispositivos electrónicos como reproductores de CD, DVD, Blu-Ray, etcétera y a la vez, son dispositivos indispensables en la fabricación de diversos aparatos de diagnóstico y tratamiento médico.

Cuando hacemos un recuento de cómo fue el surgimiento de esta nueva teoría observamos que su desarrollo no estuvo libre de asombros, cuestionamientos y discusiones por parte de los físicos involucrados. La física cuántica significó un rompimiento con algunos de los supuestos que se tenían en lo que ahora se conoce como física clásica. En secciones anteriores señalamos dos características que pertenecen al mundo subatómico y que son descritas por la física cuántica –el comportamiento dual de los componentes mínimos de la materia y el indeterminismo– y que han estimulado interrogantes de sentido epistemológico y ontológico. Los debates que han surgido alrededor de la teoría tienen que ver con el cuestionamiento de las propiedades cuánticas en los sistemas cuánticos. (Selleri, 1986)

Con respecto a las disparidades que surgieron entre la física clásica y la física cuántica, el físico francés Louis de Broglie (1951, p. 128) enlistó algunos de los ideales pertenecientes a la física clásica que no se siguen en la nueva física. Veamos:

- Debe ser posible llegar a una descripción del mundo material que de ninguna manera se preocupe ni del sabio que experimenta y que razona, ni de los medios de investigación de que se sirve para observar los fenómenos.
- Puede esperarse poder llegar a expresar en lenguaje humano, en forma perfectamente precisa, la evolución en el curso del tiempo de todo cuanto sucede en el espacio que nos rodea.
- La posibilidad de localizar de manera exacta y unívoca en el espacio y en el tiempo todas las transformaciones que se esperan (en) el mundo físico. (sic) (De Broglie, 1951)

Al observar los enunciados escritos por De Broglie se puede percibir que, de manera indirecta, algunas características de la mecánica cuántica aprobadas por la interpretación ortodoxa no satisfacen los ideales de la física clásica. Examinemos rápidamente las proposiciones de De Broglie.

Sobre el primer punto, basta con mencionar que en las descripciones que nos proporciona la física cuántica desde la postura ortodoxa, no es posible anular la influencia que tienen los instrumentos de medición en los resultados finales. Con respecto al segundo punto, podemos referir las relaciones de incertidumbre⁶¹, aceptadas como principio en esa misma interpretación. Con ellas se llega a afirmar que no es posible determinar de manera simultánea ciertas magnitudes, por ejemplo, la posición y momento; y con ello, se imposibilita trazar su trayectoria. Situación que también muestra una oposición con el tercer punto escrito por De Broglie.

Es importante reiterar que los enunciados enlistados por De Broglie corresponden a supuestos relacionados con la física clásica, que como ya se ha dicho líneas atrás, plantean concepciones opuestas con la interpretación que se otorgó al formalismo cuántico desde la escuela de Copenhague. Dicha interpretación es la que ha tenido mayor difusión, pero no por ello es la única. La exposición que se presentará en este apartado se desarrollará en torno a esa interpretación, con el propósito de advertir los elementos en los que han surgido controversias.

Volvamos a las implicaciones que se derivan de lo que De Broglie expresó en el primer punto y lo que se determina desde la interpretación estándar de la mecánica cuántica. En ese punto se hace referencia indirecta al efecto de alguna observación o medición en la física clásica, en donde dicho proceso no representa un factor que influya significativamente en la descripción o explicación de los fenómenos físicos. En los fenómenos que explica la física clásica, la interacción o perturbación provocada por el acto de medición se considera “despreciable”, o bien, tal perturbación al poder ser calculada puede ser sustraída. En otros términos: se podrían ignorar “las condiciones experimentales de la observación, haciendo que el valor de la interacción observacional, y de cualquier otro tipo de interacción, tienda infinitamente a cero” (Cadenas, 2004, p. 29). Con esto, se

⁶¹ Una presentación más detallada se encuentra en 2.2 “Representación de la característica del indeterminismo en la física cuántica a través de textos divulgativos”.

sugería que la información obtenida a partir de la observación o medida se estime como independiente del proceso de observación⁶².

Al reconocer que se tiene la capacidad de poder aislar las perturbaciones originadas por las observaciones, se dice que la información obtenida es independiente del sujeto que experimenta; como dice De Broglie, con esto se nos ha de dirigir al razonamiento básico que subyace en el realismo científico⁶³.

La propiedad de poder controlar y disminuir las perturbaciones generadas por las observaciones tiene una relación muy cercana a la idea de que los sistemas físicos evolucionan causalmente y esta evolución es siempre continua, lo cual apela al ideal de *Natura non facit saltus*⁶⁴ o principio de continuidad. Tanto Newton como Leibniz, autores del cálculo diferencial, adoptaron esta consigna. Con el cálculo diferencial e integral fue posible que se estudiaran los pequeños cambios de estado de las magnitudes en los sistemas físicos; tal situación permitiría describir la evolución de esas magnitudes de manera continua y sostener una imagen física del mundo basada en la convicción de que todas las conexiones causales son continuas en la naturaleza. (Cadenas, 2004; Papp, 1968)

Hasta aquí, se puede ver que desde la física clásica se tiende a una descripción objetiva de los fenómenos, entendida desde un sentido primario, en el que el sujeto que investiga se muestra independiente de la realidad física que estudia. Asimismo, se ha mencionado que el modelo de una naturaleza continua se relaciona con la capacidad de depreciar las perturbaciones generadas por las observaciones, y en este sentido se tiende una conexión con la condición objetiva de la ciencia. Estos elementos se verán cuestionados en la mecánica cuántica, pero antes de abordar las controversias nos detendremos un poco en las ideas básicas que se aceptan con una postura realista (en específico con el realismo científico), con la intención de advertir el papel que tiene el acto de observar en la generación del conocimiento científico, y mostrar, rápidamente, las controversias filosóficas que se han suscitado a partir de éste. La siguiente sección será un breve paréntesis que nos apoyará para posteriormente explicar las preocupaciones que surgieron

⁶² Esta idea también se puede desarrollar de la siguiente manera: “[La] noción de observación en sentido clásico, que permite obtener información del objeto tal cual es, constituye pues una idealización, por cuanto, siempre se altera el estado de los objetos observados, pero una idealización válida desde el momento en que la interacción con los aparatos de medida es perfectamente controlable, calculable y eliminable”. (Rioja, 1992)

⁶³ En la siguiente sección: “Nociones básicas del realismo científico y la problematización del papel de la observación”, se presentará una descripción un poco más amplia de esta posición epistemológica.

⁶⁴ La naturaleza no procede por saltos, o bien, la naturaleza evoluciona de manera continua.

entre los físicos fundadores de la física cuántica en torno al papel que jugó la observación en los sistemas microfísicos y a su interpretación.

Nociones básicas del realismo científico y la problematización del papel de la observación

El realismo científico sostiene que las teorías o modelos científicos generan conocimiento confiable de un mundo que existe independiente del sujeto que lo estudia y que tal conocimiento está en función de los aspectos observables e inobservables del mundo. A pesar de que existen distintas variantes sobre el significado del realismo, en todas ellas subyace la posición anterior. Por su parte, el filósofo de la ciencia Anjan Chakravartty (2016), sugiere que esta postura se ha de entender desde tres dimensiones: la ontológica, la semántica y la epistemológica. La primera de ellas nos advierte que hay independencia entre el sujeto y el mundo investigado por las ciencias; la semántica refiere al compromiso con la interpretación literal de las afirmaciones científicas sobre el mundo; y un tercer compromiso, desde la epistemología, nos señala que las afirmaciones teóricas constituyen el conocimiento del mundo. En esta idea de realismo se presenta una relación tácita con los aspectos observables e inobservables del mundo; cuando se pronuncia la independencia entre el sujeto y el objeto investigado se alude al aislamiento del proceso de observación; y con ello, las afirmaciones o proposiciones de la ciencia mantienen una relación con los aspectos observables del mundo, los cuales permitirán conocerlo.

Ahora bien, Chakravartty (2016) nos dice que todo lo observable refiere a aquello que es directamente percibido por los sentidos, mientras que lo inobservable son aquellas entidades o procesos que no pueden ser detectados de manera directa, como las partículas subatómicas. No obstante, en el realismo científico no hay una discriminación concluyente entre los observables e inobservables, situación que ha motivado varios análisis al respecto (Bogen, 2014; A. Chakravartty, 2007, 2016; Shapere, 2010). Así, la distinción puede ser ignorada si se considera que lo observable engloba estos dos señalamientos, es decir, todo aquello que es percibido directamente por los sentidos, pero también incorporamos todo aquello que se percibe a partir de los instrumentos utilizados para obtener resultados, así como aquellas entidades que se postulan por razones teóricas o explicativas.

A pesar de esta diferenciación que surge en posturas más actuales, es importante señalar que en filosofía la preocupación por determinar el papel que juega lo observable en la ciencia se presentó de manera notable en la primera mitad del siglo XX, con el movimiento del positivismo lógico y su transición al empirismo lógico.

Los filósofos que pertenecieron al positivismo lógico, también conocido como Círculo de Viena, tenían en mente varios objetivos. El principal de ellos consistió en definir un principio de verificación, esto es, un criterio que permitiera garantizar que las proposiciones de las teorías científicas fueran claras en sus conceptos y no cayeran en proposiciones sin sentido o concepciones metafísicas. Consideraban que las proposiciones de la ciencia deberían tener la capacidad de ser verificadas empíricamente: las proposiciones y sus términos tendrían que demostrar una correspondencia con la experiencia, aspecto que los ubica en una postura empirista.

En la búsqueda de este principio, los integrantes de dicho grupo analizaron elementos fundamentales de las ciencias empíricas, como su justificación, la causalidad, la inducción, la probabilidad, la experimentación, la relación entre términos teóricos y términos de observación, etcétera. Los trabajos de análisis y reflexión en esta etapa de la filosofía, al analizar los métodos y las condiciones de validez de las declaraciones en las ciencias, influyeron en reflexiones posteriores orientadas a la filosofía de la ciencia. (Reale, G; Antiseri, 2010)

Al indagar sobre los términos de observación y términos teóricos, los miembros de este grupo hicieron una distinción semejante a la indicada anteriormente: los términos observables son aquellos que se refieren a entidades y a eventos que se perciben directamente y que adquieren un significado claro y no problemático; en otras palabras: los hechos observables tienen un significado unívoco. Por su parte, los términos teóricos harían referencia a objetos que no se observan directamente, como “electrón”, “masa”, “fuerza”, etcétera, o que no son tangibles ni observables, como los conceptos matemáticos o las leyes fundamentales de las teorías científicas.

Esta distinción, proveniente de reflexiones positivistas, hizo cambiar el pensamiento de algunos científicos y también generó desacuerdos. Para el filósofo Rudolf Carnap (1891-1970), uno de los fundadores del Círculo de Viena, las teorías científicas adquieren significado cuando los términos teóricos muestran un vínculo con términos observacionales, dicho vínculo se lograría mediante las reglas de correspondencia. Señaló que en el momento en el que se logre ese enlace sería posible concebir una interpretación

de la teoría. Esto dicho de manera resumida. Pero lo propuesto por Carnap se convirtió en una de las tareas para los filósofos: “analizar y explicar cómo se da el vínculo entre los términos observacionales y los términos teóricos”, para lo cual tomaron como supuesto que la observación funcionaría como justificación del conocimiento científico. En este sentido, también llevaría a una reflexión sobre la relación entre el conocimiento y el mundo. (Olivé, L; Pérez Ransanz, A.M., 2010, pp. 11-46)

Algunas de las críticas que se le hicieron al positivismo como postura epistemológica se referían al principio de verificación y a la dicotomía entre teoría y observación. Algunas de las críticas dirigidas al principio de verificación procedían de quienes, en alguna ocasión, llegaron a participar en las reuniones del Círculo, como Hempel. También recibieron críticas por parte de los filósofos Karl Popper y Wittgenstein, quienes no fueron colaboradores del Círculo, pero sus obras *Tractatus logico-philosophicus* (1921) de Wittgenstein y *La lógica de la investigación científica* (1934) de Popper habían sido retomadas como textos básicos por los fundadores de este grupo. Wittgenstein rechazaría las pretensiones absolutistas del principio de verificación, señalando que el significado de los términos está en función de cómo son utilizados, lo que lo sitúa en una postura más pragmática. Por su parte, Popper indicaría que el principio de verificación que se pretendía establecer resultaba contradictorio e incapaz de explicar las leyes de las ciencias empíricas, para lo cual propondría el principio falsacionista⁶⁵.

Las críticas que fueron dirigidas específicamente al papel de la observación venían de Kuhn, Feyerabend y Hanson, entre otros. Ellos negaban que hubiera un lenguaje observacional puro, o que existiera tal dicotomía entre teoría y observación. Para Hanson (2010), el hecho de observar está acompañado de una “carga teórica” y a partir de ella se produce cierta interpretación al objeto o fenómeno que se está estudiando. Kuhn (2010) señaló que las interpretaciones de lo observado responden a una tradición particular correspondiente a la etapa que él llamaría “ciencia normal”, o bien, que las interpretaciones presuponen cierto “paradigma”. Para Shapere (2010) la noción de observación ha de sufrir modificaciones de acuerdo al momento histórico de la ciencia. En otros términos, la idea de observar sufre cambios en función del progreso científico y tecnológico de cada época; por ejemplo, hoy en día, gracias a los aparatos de medición más

⁶⁵ Se desarrollará más esta idea en el CAPÍTULO 3: “Alcances y dificultades al transmitir la fundamentación conceptual de la física cuántica”.

sofisticados como los microscopios, es posible estimar como objetos observables elementos que anteriormente no podrían pertenecer a esta categoría.

A pesar de las diferencias filosóficas que surgen con respecto a la concepción de observación y su papel en la ciencia, en donde también se implica la discusión de lo observable y no observable, la noción básica del realismo científico se mantiene cuando se adopta una postura en la que lo observable es aquello que se percibe de manera directa o indirecta y en la que el conocimiento científico depende de manera fundamental de contrastar las teorías con pruebas empíricas -experimentos debidamente controlados-, sin dejar de lado la observación sistemática, en la que el sujeto que investiga no representa alguna interferencia. (Olivé, L; Pérez Ransanz, A. M., 2010)

Tener presentes estas propiedades básicas del realismo científico cobrará importancia cuando abordemos las controversias que emergen al hablar de observación en la interpretación más común otorgada al formalismo de la mecánica cuántica. Asimismo, también es importante tener en consideración las dificultades filosóficas que surgen cuando se busca claridad frente a la concepción de observación en el quehacer científico, condición que se intensifica cuando se establece una interpretación de la mecánica cuántica. En este sentido, se percibe que la observación y la interpretación son nociones que se encuentran enlazadas y son elementos de importancia para la actividad científica.

Por otro lado, también hay que señalar que en la época de más auge del razonamiento positivista coexistieron los esfuerzos de los fundadores de la física cuántica por comprender el formalismo de la mecánica cuántica. A esta corriente epistemológica se le ha considerado, hasta cierto punto, el telón de fondo para concebir una interpretación al formalismo de la cuántica, principalmente para la interpretación de Copenhague.

Interpretación de la mecánica cuántica como elemento divergente

A pesar de las discrepancias entre los supuestos establecidos desde la física clásica y lo que se obtiene con la física cuántica, con el paso del tiempo y el desarrollo experimental, se ha observado que las predicciones que proporciona el formalismo cuántico gozan de una gran exactitud y no niegan lo establecido por la teoría. No obstante, la interpretación del formalismo es lo que ha sido un tema en discordia, el cual sigue generando debates entre los físicos dedicados a esta área. (Jammer, 1974)

La interpretación de Copenhague, a finales de la década de 1920, fue la primera interpretación que se desarrolló para conferir de significado a los formalismos matemáticos propuestos de manera independiente tanto por Heisenberg como por Schrödinger, durante 1925 y 1926 respectivamente. Aunque ambos formalismos fueron equivalentes, el formalismo de Schrödinger fue el que se adoptó de manera general. Desde su surgimiento, esta interpretación es la que ha tenido mayor difusión dentro del gremio de los físicos y también se ha trasladado a productos de divulgación. En la actualidad, esta interpretación es vista como sinónimo del indeterminismo, de la interpretación probabilista de la función de onda de Born y, según algunos, del principio de correspondencia y complementariedad, ambos propuestos por Bohr (Faye, 2014). De estos elementos hablaremos más adelante.

A pesar de su gran aprobación, esta interpretación no fue y aún no es aceptada de manera unánime; hubo quienes no estuvieron de acuerdo y afirmaban que la teoría no se encontraba completa, que faltaba más investigación para tener una descripción total del mundo microscópico que permitiera comprenderlo sin oponerse a los supuestos de la física clásica, como garantizar un conocimiento con independencia del observador y en la que el principio de causalidad no se pusiera en duda. Entre los que mostraron resistencia encontramos a Planck, Einstein, De Broglie y Schrödinger.

Tenemos, pues, que en el momento de haberse proclamado la interpretación de Copenhague surgió otro punto de vista de quienes no la aceptaron. Esas distintas visiones sobre el significado del formalismo se distinguieron a partir de las posiciones que Einstein y Bohr defendieron, quienes en su momento protagonizaron discusiones que se han señalado como los famosos debates entre Bohr y Einstein.

Al revisar la literatura de la filosofía de la física observamos que se alude a las divergencias que se generan por la falta de una interpretación unívoca; asimismo, parece haber un acuerdo general de la existencia de un problema en torno a la interpretación de la teoría cuántica, el cual ha sido conocido como el problema de la medición. No obstante, según Tim Maudlin (1995), tal acuerdo parece difuminarse cuando se intenta determinar con exactitud en qué consiste el problema y qué es lo que constituiría una solución satisfactoria.

Aunque se presenta esa falta de claridad sobre la definición del problema de la medición a la que apunta Maudlin, aquí se expondrán, a manera de introducción, las ideas generales que se suelen mostrar cuando se habla de esta problemática, sin la pretensión de realizar un análisis profundo como el que se da entre los físicos y filósofos dedicados a esta área.

La intención es clarificar la importancia de esta cuestión para los fundamentos de la física cuántica y cómo ésta ha sido retomada como un planteamiento de trascendencia filosófica, y en última instancia observar cómo estos planteamientos han sido trasladados a textos de divulgación.

Con esto en mente, se procederá de la siguiente manera expositiva: primero se introducirán los principios que se establecieron para la teoría desde la interpretación de Copenhague; de esta forma podremos entender los desacuerdos que surgieron entre Bohr y Einstein; posteriormente se delinearán los argumentos que cada uno defendió. Hecho esto, se abordarán las críticas que se le hicieron a la interpretación de Copenhague desde un par de artículos publicados durante 1935; uno de ellos con autoría de los físicos Einstein, Podolsky y Rosen (EPR), y el otro por Schrödinger. En una última sección indagaremos en algunos textos divulgativos que hemos elegido para distinguir cómo se presenta al lector el significado de la observación en la teoría y examinaremos qué tanto énfasis se pone en esto para mostrar el carácter fundamental que juega.

La Interpretación de Copenhague y sus supuestos

La mecánica cuántica como teoría tiene dos componentes: un formalismo y una interpretación. El formalismo se refiere a todo el aparato matemático que la constituye, como son las ecuaciones y las reglas para realizar los cálculos; la interpretación se refiere al significado que se le atribuye al formalismo, la cual respondería a la pregunta ¿qué nos dice la teoría acerca del mundo?, con esta pregunta nos estaríamos refiriendo a su componente ontológico; el cuestionamiento también puede surgir desde los resultados empíricos que se obtienen: ¿cómo interpretar los resultados empíricos?

Como se ha mencionado, la interpretación de Copenhague ha sido considerada el primer intento para comprender el mundo atómico desde el formalismo matemático propuesto por Schrödinger. Cabe señalar que ninguno de los físicos fundadores, como Niels Bohr, Heisenberg, Born o Dirac, utilizó el término interpretación de Copenhague para identificar a sus ideas, sino que dicha etiqueta fue introducida tiempo después por quienes reconocían características en común entre las interpretaciones formuladas por Heisenberg y Bohr a finales de la década de 1920, y quienes, además, mostraban una resistencia a la noción de complementariedad propuesta por Bohr (Faye, 2014). Más adelante nos detendremos un poco en este término.

La propuesta de Erwin Schrödinger se fundamentó en la ecuación que hoy se conoce como ecuación de Schrödinger⁶⁶, valorada como el elemento esencial de la física cuántica. Gracias a esta ecuación se obtuvieron las energías de las órbitas de los electrones en el modelo atómico de Bohr. También se pudo establecer cómo evoluciona cualquier sistema cuántico a través del tiempo, pues al tener la capacidad de determinar un estado del sistema en un momento inicial sería posible definir los estados del sistema posteriores o anteriores; en este sentido, la ecuación tiene la propiedad de ser lineal y determinista. Cabe precisar que un sistema consiste en cualquier partícula, como puede ser un electrón, o también puede referir a un conjunto de partículas. Como se ha advertido en la parte introductoria de este capítulo, el carácter de individual del sistema se otorga de acuerdo con la interpretación que se le dé a la ecuación de Schrödinger.

Al inicio de este capítulo también mencionamos que el componente principal de la ecuación de Schrödinger es la función de onda (ψ), con la que se introduce el carácter ondulatorio de los sistemas cuánticos. Esta función se asocia a cualquier sistema cuántico y contiene toda la información que se puede conocer del sistema. Consiste en una función matemática que nos permite determinar los estados del sistema. Cada estado se determina por los observables, en otros términos, por las propiedades que son objeto de medición. Estos observables o propiedades pueden referirse a la posición, el momento lineal, la energía o el espín⁶⁷, los cuales se verán restringidos por las relaciones de incertidumbre entre dichas propiedades.

Una de las primeras interpretaciones para la función de onda (ψ), propuesta por el propio Schrödinger, fue suponer que las partículas adquirirían el carácter ondulatorio como cualquier onda física que se propaga en el espacio. Asimilar esta suposición significaba que se le otorgaba una representación física a la función. Esta posición recibió algunas críticas;

⁶⁶ En 1925 Schrödinger formuló su ecuación: $H(t)|\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle$. Se trata de una ecuación diferencial conformada por conceptos matemáticos que van más allá de nuestros propósitos, pues el interés aquí es observar sus implicaciones conceptuales. Schrödinger se basó en el postulado de De Broglie para formular su ecuación; ese postulado indicaba que el movimiento de una partícula en la escala atómica está gobernado por su onda asociada, con el que se declaraba el comportamiento dual de las partículas. Esta ecuación logró éxito debido a que permitió obtener resultados para cada estado estacionario —cuando el estado del sistema no depende del tiempo— de tal manera que pareciera que prevalecía una continuidad.

⁶⁷ Se trata de una propiedad inherente de las partículas subatómicas que no tiene referencia o analogía con alguna característica de los objetos a nuestra escala. A pesar de ello, se le suele caracterizar como el “momento angular o giro” de las partículas. Los valores que toma el espín son múltiplos enteros de $\frac{\hbar}{2}$, donde \hbar es igual a la constante de Planck, h , dividida entre 2π .

una de ellas fue por parte del físico neerlandés Hendrik Lorentz⁶⁸, quien le escribió a Schrödinger:

Si le he entendido correctamente, entonces una «partícula», un electrón por ejemplo, sería comparable a un paquete de ondas [...]. Pero un paquete de ondas a la larga nunca puede permanecer unido ni confinado a un pequeño volumen. La más pequeña dispersión en el medio lo disgregará en la dirección de propagación e incluso sin esa dispersión se abrirá más y más en la dirección transversal. Debido a esta inevitable dispersión del paquete de ondas, no me parece que sea muy adecuado para representar cosas a las que queremos adscribir una existencia individual permanente. (En: Sánchez Ron, 2005, p. 466)

De acuerdo con lo anterior, a pesar de haber designado la función de onda, quedaba suspendida la pregunta ¿cómo interpretar a la función de onda (ψ)?, ¿qué significado físico otorgar a la ecuación?

En 1926, Max Born (1882-1970) incorporó la regla de Born a la ecuación de Schrödinger, lo que dio como resultado el carácter probabilista e indeterminista en la teoría. Con ello se interpretó a la función de onda (ψ) como la que expresa las probabilidades de los diferentes estados permitidos en un sistema. Para Born, la magnitud del cuadrado de la función de onda, $|\psi|^2$, representa la densidad de probabilidad, esto es, la probabilidad de encontrar una partícula dentro de un cierto volumen.

Despleguemos este ejemplo. Para obtener la posición de una partícula tendremos que la función $|\psi(x, y, z, t)|^2$ representará la densidad de probabilidad $P(x, y, z, t)$ de encontrar una partícula en una posición (x, y, z) en un tiempo t . Cuando ψ tome un valor más alto, allí habrá mayor probabilidad de encontrar a la partícula, y donde el valor de ψ sea menor, por consiguiente, la probabilidad también será menor. (Cushing, 2003; Selleri, 1986)

A diferencia de la interpretación que Schrödinger otorgó a la ecuación –a la cual se le daba un significado físico–, para Born el resultado de la ecuación solamente tiene un carácter simbólico y no material. La propuesta de Born resultó muy fructífera en la práctica; permitió vincular el formalismo matemático con los experimentos, las predicciones alcanzadas con el formalismo resultan compatibles con la evidencia empírica (Okon, 2014). Sin embargo, desde su trasfondo filosófico se considera una suposición antirrealista, pues

⁶⁸ La carta dirigida a Schrödinger data de 1926. Al año siguiente, Lorentz estaría organizando la quinta conferencia de Solvay que versó sobre el tema “Fotones y electrones”, en donde se discutiría sobre la interpretación del formalismo de la mecánica cuántica.

las ondas de Born no son valoradas como reales, esto es, no son consideradas como si tuvieran un referente en el mundo físico⁶⁹.

De acuerdo a Faye (2014), Bohr aceptó la interpretación probabilista de Born por su capacidad de predecir resultados probabilísticos para las mediciones en condiciones bien definidas; además, le adjudicaba un significado simbólico, sin una representación real, para lo cual alude a la cantidad imaginaria, i , que está contenida en la ecuación de Schrödinger. Valorando esta postura, ha sido posible considerarlo un antirrealista o instrumentalista frente a la teoría. La aprobación del carácter probabilístico de la función de onda corresponde a una de las propiedades que identifican a la interpretación de Copenhague.

Como se ha dicho líneas atrás, en el momento en el que se hace una medición se obtiene un valor determinado para un estado del sistema. El contraste que se manifiesta entre lo que se establece con la ecuación de Schrödinger y lo que ocurre al momento de hacer la medición, esto es, del paso que se da del carácter determinista y temporal de la ecuación, al indeterminismo e instantaneidad al aplicar la regla de Born y al realizarse una medición, ha suscitado algunos cuestionamientos de índole filosófica hacia la teoría que se relacionan con el problema de la medición.

De lo expuesto anteriormente tenemos que en la interpretación ortodoxa se aceptan los siguientes elementos: la ecuación de Schrödinger y su función de onda, los resultados probabilísticos, en donde implícitamente encontraremos a las relaciones de incertidumbre y la relevancia del acto de medir.

Regresemos un poco a la historia de esta interpretación. Bohr dio a conocer públicamente su interpretación de la mecánica cuántica en el marco del Congreso Internacional de Física celebrado en la ciudad de Como, Italia, en 1927. Ahí realizó una presentación titulada “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica”⁷⁰; ésta comenzó así:

Trataré, apoyándome en consideraciones muy simples y sin entrar en detalles técnicos de carácter matemático, de describir a ustedes una forma común de enfocar la cuestión que creo es adecuada para dar una impresión de la tendencia general del desarrollo de la teoría desde sus inicios, y espero que sea útil a fin de armonizar los puntos de vista aparentemente conflictivos que defienden distintos científicos. (Bohr, 1927. En: Aaserud, 2007, p. 98)

⁶⁹ Cfr. En la sección “Diferentes lecturas hacia el formalismo matemático de la teoría” al inicio de este segundo capítulo.

⁷⁰ Su título original fue “The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory”, publicado en la revista *Nature* núm.121, en 1928.

En el anterior fragmento, Bohr hace ver que en ese momento ya existían distintos puntos de vista respecto a cómo considerar las implicaciones de la teoría. Esa misma apreciación fue señalada años más tarde por Max Born durante su discurso en el premio Nobel (1954):

Cuando digo que los físicos aceptaban el modo de pensar que en aquella época habíamos desarrollado no estoy siendo del todo correcto. Entre los investigadores que contribuyeron de manera destacada a la construcción de la mecánica cuántica hubo algunas excepciones notabilísimas. El mismo Planck estuvo entre los escépticos hasta su muerte y Einstein, De Broglie y Schrödinger no dejaron nunca de subrayar los aspectos insatisfactorios de la teoría. (Born, 1954, p. 89. En Selleri, 1986)

En la presentación de 1927, Bohr afirmaría que en los procesos de medición de la mecánica cuántica no podía haber una total separación entre el fenómeno y el observador, refiriéndose con el término de “observador” al dispositivo de medición⁷¹. En algunas ocasiones Bohr hizo referencias al sujeto como observador para señalar un vínculo entre el sujeto y el objeto a medir; este tipo de menciones han provocado malentendidos y el significado de “observador” se ha extendido a la intervención de una “conciencia” en los procesos de medición⁷². No obstante, es importante reiterar que en física no hay observadores como “entes perceptuales conscientes”, sino que al hablar de “observador” se refiere a instrumentos de medición.

Ahí mismo, Bohr también expuso su idea de complementariedad y señaló los supuestos que posteriormente formarían parte de lo que hoy se conoce como interpretación de Copenhague. El concepto de complementariedad se trata de una idea introducida por Bohr como un intento de fundamentar y explicar las descripciones de la mecánica cuántica que parecen opuestas a nuestra intuición. Es común encontrar dentro de algunos libros de texto que este concepto se presenta de manera breve y lo vinculan a la imagen dual del comportamiento de las partículas, es decir, que estos objetos microscópicos pueden actuar como partícula o como onda⁷³ (Dicke, R. H. & Wittke, 1960; Eisberg, R. & Resnick, 2013; Griffiths, 1995; Saxon, D, 1968).

⁷¹ Es importante señalar que el término de “observador” está ligado con las concepciones sensoriales del ser humano, pero también se refiere a los instrumentos utilizados para la observación (Shapere, 2010). Ver el apartado “Nociones básicas del realismo científico y la problematización del papel de la observación” de esta sección.

⁷² En el tercer capítulo abordaremos cómo estas declaraciones fueron retomadas por otros autores para justificar otro tipo de ideas que quedan fuera de la teoría de la física cuántica.

⁷³ Cfr. Sección 2.1 “Representación del comportamiento dual de los componentes mínimos de la materia en la mecánica cuántica a través de textos divulgativos”.

A pesar de la semejanza de las exposiciones presentadas en los textos escolares, dentro del gremio de los físicos dedicados a esta rama, así como para los filósofos de la física, la idea de complementariedad ha sido motivo de análisis, crítica y discusión, debido a las múltiples interpretaciones que se pueden derivar de las declaraciones que Bohr expresó en 1927, año en el que por primera vez hizo referencia a esta noción durante la presentación ya referida aquí.

De acuerdo con Jan Faye (2014), Bohr consideró complementarias dos tipos de descripciones. En las primeras, como comúnmente se ha señalado, se atribuyen propiedades ondulatorias y propiedades de partícula a un mismo objeto. Las segundas descripciones complementarias serían las que señalan propiedades cinemáticas o dinámicas a las partículas, es decir, son complementarias las descripciones del movimiento en función del espacio y el tiempo con aquellas que buscan la causalidad del movimiento. Con esto presente, el razonamiento de Bohr apunta a que ambas descripciones se considerarían complementarias por contener elementos opuestos pero necesarios para comprender el proceder de la naturaleza a nivel cuántico. Bohr advierte que la confusión que produce tal noción se deriva del uso del lenguaje o de los términos. Esta última idea fue aprobada por varios positivistas. Para Bohr, al aceptar la idea de complementariedad como “principio” no sería necesario preguntarse por los fundamentos de los fenómenos cuánticos (Bunge, 1956). De nuevo se puede percibir una postura que se ajusta a los ideales de una filosofía positivista.

Con esas dualidades Bohr buscó ilustrar su concepto de complementariedad, pero precisamente por la falta de una definición delimitada han surgido dificultades para comprender de manera precisa la postura del físico danés. Una de las críticas que ha recibido es que no da una explicación de cómo los dos tipos de descripciones señaladas en líneas atrás están relacionados entre sí (Murdoch, 1987). Otro aspecto por considerar es que en las distintas referencias que hace Bohr de la complementariedad en diversas presentaciones, en distintas fechas, se advierte que el concepto sufre cambios en su descripción, situación que también fomenta que se considere un concepto problemático y que se comprometa su entendimiento cabal⁷⁴. Pongamos un par de ejemplos de las

⁷⁴ Para conocer un poco más a fondo sobre las interpretaciones y los antecedentes de este concepto se puede consultar la entrada “Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics” de Jan Faye, publicado en la *Stanford Encyclopedia of Philosophy*.

presentaciones en las que Bohr refirió a la complementariedad. En la conferencia de Como en Italia:

Para tener en cuenta el postulado cuántico en la descripción de los fenómenos atómicos, debemos desarrollar una «teoría de la complementariedad» [...] esta concepción se impone ya con claridad en la controvertida cuestión de la naturaleza de la luz y de las partículas materiales elementales. La teoría de la complementariedad [...] no se trata aquí de contradicciones, sino más bien de descripciones complementarias de los fenómenos que sólo juntas constituyen una generalización natural del modo de descripción clásico. (Bohr, 1988, pp. 100-102)

En 1949, durante una charla en radio dirigida a estudiantes de educación básica en nivel secundaria, Bohr presenta un recorrido histórico sobre el entendimiento de los átomos, comenzando con la perspectiva de los griegos hasta la comprensión que se tuvo con la mecánica cuántica. Aquí presentó, de nuevo, su idea de complementariedad:

Algunos de ustedes tal vez ya han oído hablar de las sorprendentes dificultades con que se ha enfrentado la cuestión de la naturaleza de los electrones. Por un lado, podemos considerar el electrón como una partícula, ya que las mediciones de la masa y la carga eléctrica de un electrón siempre dan los mismos resultados. Por otra parte, al describir otras propiedades de los electrones, debemos utilizar imágenes de onda similares a las que han demostrado ser indispensables para la descripción de la propagación de la luz. También hemos encontrado sorpresas del mismo tipo con respecto a la cuestión de la naturaleza de la luz, ya que la imagen ondulatoria es bastante insuficiente para explicar las leyes que se aplican cuando los átomos absorben y emiten energía luminosa, y para explicar esto hemos tenido que recurrir a una descripción de la luz compuesta de quanta de luz, o de fotones, que actúan como partículas. Tal situación, hasta ahora bastante desconocida en física, debe parecer inicialmente bastante confusa, pero poco a poco *nos hemos dado cuenta* que cuando se utilizaban las imágenes contradictorias, nunca debía describirse un solo y mismo fenómeno, sino sólo explicar las experiencias adquiridas en diferentes condiciones experimentales que se excluyen entre sí. Tales experiencias están en una relación que llamamos *complementarias* para enfatizar que, aunque no pueden unirse en un cuadro visualizable, cada una de ellas es una expresión de aspectos igualmente importantes en la información completa que se puede obtener en conjunto. (Bohr, 1949, p. 69)

A pesar de las críticas por parte de diversos autores hacia el concepto de complementariedad, Faye (2014) busca dilucidarlo al señalar que este concepto se trata de “una lectura semántica y epistemológica de la mecánica cuántica que conlleva ciertas implicaciones ontológicas [...] donde las condiciones de verdad de las oraciones que atribuyen un cierto valor cinemático o dinámico a un objeto atómico dependen del aparato de medición implicado, de tal manera que las condiciones de verdad tienen que incluir una referencia a la configuración experimental, así como el resultado real del experimento”. Con esta descripción, Faye hace manifiesto el papel que juega el proceso de medición en este concepto. Sin embargo, no logra otorgarle suficiente claridad.

Aun con la falta de un significado unívoco, la noción de complementariedad se ha considerado uno de los elementos más controvertidos y clave para la interpretación de Copenhague. No obstante, es importante señalar que se tiene que tomar con cautela y no valorarla como un elemento físico de la teoría, sino como una especie de doctrina que Bohr planteó para conciliar la dualidad onda-partícula y las concepciones típicas de causalidad con el principio de incertidumbre, misma que posteriormente fue acogida, en un cierto sentido, por sus discípulos, aunque Heisenberg y Born nunca se mostraron totalmente convencidos.

Ahora pasemos a exponer la relevancia que tienen, para esta interpretación, las perturbaciones o interacciones que se dan entre el sistema cuántico que se busca medir y el aparato de medición. Esta situación muestra un vínculo muy estrecho con las relaciones de incertidumbre, adoptadas como principio en la interpretación ortodoxa.

Para ilustrar el papel que juegan las perturbaciones en una medición, imaginemos lo siguiente: supongamos que se quiere obtener, a través del formalismo de la mecánica cuántica, la posición y la trayectoria de un sistema cuántico; un electrón, por ejemplo. Para ello retomemos el experimento imaginario conocido como microscopio de Heisenberg, en el que se pretende observar el electrón por medio de un dispositivo que emite luz, o fotones a cualquier longitud de onda⁷⁵.

De acuerdo con lo que se expone en la sección 2.2 de este capítulo, con las relaciones de incertidumbre no es posible determinar con exactitud la posición y momento de un sistema cuántico de manera simultánea. Lo que se obtiene son resultados probabilísticos para cada una de las magnitudes conjugadas; si obtenemos cierto valor para la posición, perdemos certeza del valor que correspondería para el momento, y sucede lo mismo de manera inversa. Considerando esto, no sería posible determinar la trayectoria del sistema, debido a que no es posible obtener valores específicos de manera simultánea de estas magnitudes para cada instante de tiempo. Con ello se restringe el hablar de causalidad en un sentido fuerte⁷⁶ y se habla de una “causalidad probabilista”.

⁷⁵ Ha sido propuesto por Werner Heisenberg para exhibir las implicaciones que se derivaban de las relaciones de incertidumbre. Cfr. En la sección anterior: “Representación de la característica de indeterminación en la física cuántica a través de textos divulgativos”.

⁷⁶ Basada en la afirmación de que el conocimiento exacto de las magnitudes en un momento presente permite calcular los valores de estas magnitudes en un momento futuro. Ver la sección “Representación de la característica de indeterminación en la física cuántica a través de textos divulgativos”.

Sobre lo anterior, en la presentación en el Congreso de Como y en la quinta conferencia de Solvay, Bohr había hecho algunas advertencias sobre el papel que juega la observación como perturbadora de los objetos cuánticos y la valora como una característica distintiva de la mecánica cuántica, situación que marcaría una diferencia con las descripciones dadas a los fenómenos a nuestra escala a través de la física clásica. Seguido de esto, Bohr señalaría que la propia naturaleza de la teoría cuántica nos llevaría a cuestionar la afirmación de causalidad en los fenómenos:

Por un lado, la definición del estado de un sistema físico, como ordinariamente se entiende, afirma la eliminación de todas las perturbaciones externas. Pero en ese caso, de acuerdo con el postulado cuántico, cualquier observación será imposible, y, sobre todo, los conceptos de espacio y tiempo pierden su sentido inmediato. Por otro lado, si para hacer posible la observación permitimos ciertas interacciones con los instrumentos de medición, que no pertenecen al sistema, una definición inequívoca del estado del sistema ya no es posible, y no puede haber ninguna cuestión de causalidad en el sentido ordinario de la palabra. La propia naturaleza de la teoría cuántica obliga a que consideremos la descripción de espacio-tiempo y la afirmación de causalidad, la unión que caracteriza a las teorías clásicas, como elementos complementarios pero exclusivos de la descripción, simbolizando la idealización de la observación y la definición respectivamente. (Bohr, 1988)

El físico Paul Dirac (1958) hace alusión a lo anterior pero no refiere a los conceptos propios de Bohr, como el postulado cuántico y a la complementariedad. Dirac señala que las perturbaciones de la observación ocurren en función del tamaño de los objetos a observar. Indica que cuando la perturbación es despreciable, entonces el objeto es grande y habrá de aplicarse la mecánica clásica. Pero si la perturbación no se puede ignorar, entonces el objeto es pequeño y se requiere de la teoría cuántica. En este sentido concluye que cuando se tiene un sistema microfísico, no es posible observarlo sin producir una alteración considerable.

Cuando tenemos un sistema en el que la observación no produce alguna alteración o perturbación considerable, es posible reconocer las conexiones causales entre las condiciones de un momento determinado y las condiciones en un momento posterior. No obstante, en los sistemas microfísicos, debido a la notable perturbación, no es posible obtener las conexiones causales entre los resultados de las observaciones. En este sentido, Dirac señala que en estos sistemas hay una indeterminación inevitable al calcular los resultados observacionales.

Como vemos, lo descrito por Dirac se ajusta a los ideales que Bohr planteó. Por un lado, se asume una descripción indeterminista en los procesos microfísicos y se avala la aceptación de esta limitación, mitigando las exigencias de obtener una descripción

determinista en el sentido clásico (Faye, J. & Folse, 1994; Faye, 2014; Navarro, 2010). Por otro lado, la distinción entre los objetos cuánticos y los aparatos macroscópicos utilizados para las mediciones se vuelve fundamental. Es a través de las mediciones que se puede obtener información del mundo cuántico; sin embargo, hay que tener presente que las mediciones siempre tendrán un efecto en el sistema, situación que también sucede en la mecánica clásica con objetos a nuestra escala, aunque allí la medición no provoca una alteración en el objeto, y por ello se puede hacer despreciable. Es decir, en la mecánica cuántica, siguiendo a la interpretación de Copenhague, la información sobre las propiedades físicas de cualquier sistema estará en función tanto del estado del sistema microscópico como del instrumento de medida utilizado.

Cuando se habla de medición en sistemas cuánticos sobresale un elemento esencial para la Interpretación ortodoxa; éste es el postulado de proyección o colapso de la función de onda. Descrito a grandes rasgos, este postulado señala que antes de realizar alguna medición a un sistema cuántico, digamos para obtener la posición de una partícula, la función de onda (ψ) ofrece una serie de posibilidades para el resultado de la medición respecto a la posición. En otros términos: antes de la medición, la función de onda se encuentra en un estado de superposición, o bien, el sistema cuántico puede estar en alguno de los estados posibles. Sin embargo, en el momento en el que se realiza la medición, una de las múltiples posibilidades se manifiesta y las demás se anulan, por lo que se obtiene así un resultado preciso. Es en ese momento que se dice que la función de onda “colapsa” en alguna de las posibilidades. Con ello, se hace visible una paradoja que se deriva del conflicto entre las predicciones de dos de sus componentes fundamentales: la ecuación de Schrödinger y el postulado del colapso. Valorar a la función de onda y su colapso como elementos de la interpretación se ha convertido en uno de los problemas más debatidos de la física actual.

A manera de resumen, se consideran elementos base para la interpretación de Copenhague: la ecuación de Schrödinger y su función de onda; las relaciones de indeterminación de Heisenberg, de la cual se derivan los estados del sistema permitidos; y los resultados probabilísticos antes de cualquier medición. El proceso de medición se convierte en un actor importante en la teoría que conlleva una problemática de sentido ontológico con el colapso de la función de onda. Hay que destacar que, al valorar el principio de incertidumbre como uno de los pilares de esta interpretación, se llega a la resolución de negar la causalidad en el sentido de la física clásica. Otro rasgo es la noción

de complementariedad, que no cuenta con una resolución homogénea como sugiere Faye (2014) ni tampoco con una aceptación total, y como se ha mencionado anteriormente, no se trata de un elemento que se pueda valorar físicamente. Con los supuestos o principios señalados anteriormente, la interpretación de Copenhague parecía mostrar una imagen “completa” de la mecánica cuántica a pesar de que no se podía llegar a una explicación exacta de lo que ocurre en el mundo a escala cuántica. Ella fue respaldada por varios físicos, pero tal interpretación no fue acogida de manera unánime.

Como vemos, en cada uno de los elementos fundamentales de la teoría han surgido dificultades o discusiones por la oposición que representaron frente a los principios que se seguían en la física clásica. Esta situación permitió abrir un espacio para el análisis, tanto desde la perspectiva de la propia física, como de la filosofía e historia de la ciencia; aunque también debería interesar a quienes se dedican a divulgar esta teoría, pues les proporcionaría una mayor claridad en aquello que se quiere comunicar para contribuir a una postura más crítica.

A continuación, observaremos los primeros desacuerdos hacia la interpretación de Copenhague desde las posturas de Einstein y Schrödinger. Posteriormente volveremos a retomar el problema de la medición y su cercana relación con la noción de observación. Finalmente, examinaremos cómo estos disentimientos hacia la Interpretación ortodoxa se reflejan en los textos divulgativos seleccionados.

Los debates entre Bohr y Einstein

En el transcurso de 1925, tanto Heisenberg como Schrödinger habían presentado sus propuestas matemáticas para la mecánica cuántica⁷⁷. En diciembre del siguiente año, Einstein estaría escribiendo una carta a su amigo Born en la que enunciaría la frase “Dios no juega a los dados”, expresión que se volvió popular y que ha causado controversias al sacarla del contexto en la que fue mencionada. En la carta, Einstein escribió:

⁷⁷ En 1925, Heisenberg desarrolló el formalismo de la física cuántica a partir de la mecánica de matrices inconmutables, basado en las magnitudes observables o medibles. Las matrices inconmutables nos indican la imposibilidad de medir simultáneamente con precisión exacta ambas matrices. Por su parte, Schrödinger, en 1926, desarrolló la “ecuación de Schrödinger”, la cual contiene a la función de onda (ψ). Ambas propuestas resultarían equivalentes matemáticamente.

La mecánica cuántica es algo muy serio. Pero una voz interior me dice que de todos modos no es ese el camino. La teoría dice mucho, pero en realidad no nos acerca gran cosa al antiguo secreto. En todo caso estoy convencido de que *Él* no juega a los dados. (sic) (Einstein, 1999)

En el fragmento anterior se aprecia la desaprobación de Einstein respecto al camino que estaba tomando la mecánica cuántica. Para Born, esta posición resultaba de un rechazo fundado en una “voz interior” y no por un debido razonamiento, además, la postura de Einstein se basaba en una profunda diferencia de posturas filosóficas entre la generación más joven de físicos y él (Einstein, 1999). Tiempo después de haber escrito a Born, Einstein haría pública su postura.

A pesar de que Bohr ya había expuesto sus ideas sobre la interpretación de la mecánica cuántica dentro del congreso de Como en 1927, fue hasta la presentación que él realizó en la quinta Conferencia de Solvay cuando surgieron réplicas por parte de Einstein, quien estuvo presente en dicho evento.

Las discusiones entre Bohr y Einstein tuvieron lugar tanto en la quinta como en la sexta Conferencia de Solvay. En ambos congresos estuvieron presentes varios de los fundadores de la mecánica cuántica, como Bohr, Born, De Broglie, Dirac, Ehrenfest, Heisenberg, Pauli, Schrödinger, Einstein, entre otros físicos de la época. Fue en ese contexto donde se discutió uno de los problemas más polémicos dentro de la física: el significado de la nueva teoría cuántica desde el formalismo matemático desarrollado por Heisenberg y Schrödinger, cada uno con distintas estructuras matemáticas. Las propuestas de ambos físicos fueron bien aceptadas debido a las predicciones que arrojaban, sin embargo, fue el significado implícito lo que entraba en discusión. En cada una de las presentaciones los participantes del congreso exponían sus puntos de vista sobre la teoría cuántica, situación que permitió demarcar dos corrientes de pensamiento que se perfilaron con base en los desacuerdos entre Bohr y Einstein, cada uno de ellos con sus respectivos partidarios.

Los cuestionamientos se referían al significado que se le debería otorgar a la idea de realidad física, noción que se evalúa en función de la observación, o bien, de los procesos de medición⁷⁸.

Para quienes aceptaron la interpretación de Copenhague, con el hecho de obtener predicciones precisas de carácter probabilístico que concordaran con los resultados

⁷⁸ Ver el primer apartado “Nociones básicas del realismo científico y la problematización del papel de la observación” de esta sección 2.3.

experimentales se cumplía con el criterio empírico de las teorías científicas, es decir, el de obtener predicciones precisas. Éste es un aspecto que destaca en los razonamientos dados por la corriente filosófica del positivismo. Por otro lado, con la función de onda se lograba cumplir con el aspecto determinista, aunque este se perdía en el momento de realizar alguna medición, es en ese momento cuando aparece en escena el postulado del colapso de la función de onda.

Por su parte, Einstein consideraba la mecánica cuántica una teoría exitosa pero provisional, y creía que la realidad física objetiva existía independientemente de si hay interacción con ella. Intentó mostrar que la mecánica cuántica, entendida desde los razonamientos probabilistas de la interpretación de Copenhague, contenía inconsistencias; no aprobaba el indeterminismo ni el colapso de la función de onda debido a que los consideraba contradictorios a una postura realista, además valoraba la teoría como incompleta.

Después de la presentación de Bohr en la quinta Conferencia de Solvay, Einstein ideó un experimento mental en el que buscaba mostrar la incompletitud de la teoría. Éste consistía en imaginar un arreglo experimental en el que una partícula, consideremos un electrón, atraviesa por un pequeño orificio y después choca con una pantalla que detecta en qué posición se encuentra. Siguiendo la interpretación de Copenhague, antes de que el electrón sea detectado en el punto en el que choca con la pantalla, se aceptaría que las posiciones posibles en las que se detectaría este electrón cubren toda la pantalla, o bien, en términos de esta interpretación, el electrón se encontrará distribuido en toda la pantalla. De ser así, cada punto espacial en la pantalla contará con cierto porcentaje de probabilidad de que el electrón sea detectado en ese punto. Sin embargo, una vez que el electrón se detecte en, por ejemplo, el punto A, las probabilidades de encontrar el electrón en cualquier otro punto, señalado como B, se anulan de manera instantánea.

Para Einstein, la idea de que el electrón estuviera virtualmente presente en todos los espacios de la pantalla antes de haber sido detectado, observado o medido y que al hacer una observación en A implicaría una afectación en B de manera instantánea significaría hablar de una acción a distancia; situación que desde la relatividad espacial se descarta, pues en ella se indica que un efecto no podrá propagarse instantáneamente entre dos puntos que se encuentran separados espacialmente. Por otro lado, si la mecánica cuántica no es capaz de determinar la trayectoria que siguió el electrón cuando atraviesa el orificio hasta llegar a la pantalla, se trataría de una teoría incompleta.

Ante este ejercicio mental, Bohr no desarrolló una gran respuesta, solamente mencionó que a la teoría se le estaba exigiendo más de lo que podía ofrecer. Señaló: “hay que darse cuenta de que estamos lejos de aquel estado donde uno podría esperar describir las cosas a partir de teorías clásicas”. (Whitaker, 1996)

El hecho de detectar al electrón en cualquier punto específico supone la idea de observación, noción de gran importancia dentro de la teoría, pues en cuanto acontece este suceso las cantidades probabilistas, las cuales indican las densidades de probabilidad de encontrar al electrón en el área de la pantalla, se convierten en un solo valor definido, el cual ha de coincidir con uno de los valores previstos. Hay quienes mencionan que este suceso consiste en un determinante de la realidad. A la pregunta de qué es lo que determina el valor resultante tras la observación, los físicos que aceptan la interpretación de Copenhague han brindado una gran variedad de respuestas, que van desde negar –como Pauli– que exista causa alguna que lo determine, hasta afirmar –como Wigner y Von Neumann–⁷⁹ que es un acto de la conciencia la que determina el efecto de haber observado o medido.

No obstante, los argumentos en contra de la interpretación de Copenhague no se detuvieron allí. Otra discusión apareció en 1930, esta vez en el sexto Congreso de Solvay, en la que Einstein planteó otro experimento mental que buscaba rebatir el principio de incertidumbre. El experimento consistía en imaginar una caja llena de luz, que tendría un orificio que podría abrirse cuando se dispusiera; el tiempo de apertura del orificio estaría controlado por un reloj instalado en el interior de la caja. La idea era que cuando el orificio se encontrara abierto durante un periodo de tiempo (t) un solo fotón pudiera escapar por allí. Si la caja fuera pesada antes y después de la salida del fotón con una báscula de gran precisión obtendríamos una diferencia de masa (m) y la energía del fotón (E): esta información se podría obtener a partir de $E = mc^2$. Al contar con esta información sería posible determinar la energía del fotón y el tiempo en el que fue emitido. Sin embargo, al aceptar el principio de incertidumbre no sería posible obtener ambos valores de manera simultánea ni exacta, aunque para Einstein con este experimento se demostraba un caso en el que sí era posible. (Whitaker, 1996)

La respuesta de Bohr a este argumento se hizo esperar hasta el día siguiente. Bohr se había dado cuenta de que existía un defecto en el razonamiento de Einstein. Indicó que en

⁷⁹ Cuyo pensamiento podría corresponder a una postura filosófica idealista.

el momento en el que se deja liberar un fotón, la caja sufre un pequeño retroceso (para conservar el momento) y la posición de la caja en el campo gravitacional se vuelve incierta. De ser así, y según la teoría general de la relatividad, desarrollada por el propio Einstein, esto provocaría una incertidumbre en el tiempo, conservando el principio de incertidumbre entre el tiempo y la energía.

Hay quienes señalan este acontecimiento como la victoria por parte de Bohr y la interpretación de Copenhague. De acuerdo con Arthur Fine, quien ha estudiado la correspondencia entre Bohr y Einstein, no hay registro, después de lo sucedido en 1930, de algún cuestionamiento por parte de Einstein sobre la validez de las fórmulas de incertidumbre. Sin embargo, a pesar de considerar esta particularidad señalada por Fine, esto no puede ser considerado un indicador suficiente de que Einstein haya aceptado la postura de Bohr. En 1935, Einstein en conjunto con Boris Podolsky y Nathan Rosen publicaron un artículo que representó el mayor reto, hasta ese momento, para la interpretación de Copenhague, pues anteriormente no se habían dado argumentos que representaran cuestionamientos severos hacia dicha interpretación. Este artículo se abordará en la siguiente sección.

Otro aspecto para señalar como elemento de disparidad entre los razonamientos de Einstein y Bohr concierne a sus posturas filosóficas frente a la ciencia. Por un lado, Einstein mostraba una postura totalmente realista y manifestaba su desacuerdo con el significado que se le había atribuido al proceso de medición desde la interpretación de Copenhague, pues le resultaba incompatible con la concepción de “lo físicamente real”.

Hay que señalar que la postura filosófica de Einstein no permaneció íntegra a lo largo de su historia como científico. Años atrás, cuando desarrolló la teoría especial y general de la relatividad, estuvo influenciado por el trabajo de Ernst Mach (1838 - 1916), físico y filósofo austríaco que defendía una postura positivista y afirmaba que toda declaración científica debe tener un referente empírico. Pese a ello, pronto abandonaría las ideas de Mach, al darse cuenta que no era posible reducir todos los elementos de una teoría a experiencias sensoriales. (Cushing, 2003; Sánchez Ron, 1995)

Por otro lado, es común encontrar que la postura filosófica de Bohr, o en específico de la interpretación de Copenhague, se clasifique como positivista o también como antirrealista cuando se introduce el postulado del colapso (Beller, 1999; Cushing, 2003), por el gran valor que toma el proceso de observación para obtener un resultado específico, en donde pareciera que la realidad se define sólo a partir de la observación. Aunado a esto,

también se ha destacado la relación de Bohr con algunos empiristas lógicos, como Otto Neurath, Philip Frank y el danés Jørgen Jørgensen, durante la década de 1930, periodo en el que se gestó la interpretación ortodoxa y en el que el empirismo lógico se encontraba en una época de auge. En relación a esto, se ha señalado que varios de los empiristas lógicos encontraron apoyo para su filosofía en la interpretación de Bohr (Faye, 2014); tales circunstancias han favorecido la idea del vínculo entre la postura de Bohr y, por consiguiente, de la interpretación de Copenhague, con el positivismo. De igual modo, al pensamiento de Bohr se le han atribuido elementos de la filosofía de Kant, por ejemplo, la creencia en la posibilidad de deducir conocimiento necesario e inevitable del análisis de condiciones de la experiencia (Sánchez, 1995, p. 208)

Desde otra perspectiva, Jan Faye (2014) muestra otra visión de la postura de Bohr e indica que la etiqueta de positivista no se le puede conferir, pues afirma que él nunca apeló a una teoría verificacionista, criterio derivado del positivismo, y que tampoco afirmó que los conceptos de la física clásica deberían de estar dados a partir de su relación con la experiencia. También argumenta que Bohr no habló de un colapso de la función de onda como algo físicamente real, sino como un carácter simbólico atribuido a la función. A pesar de la justificación que Faye desarrolla para el pensamiento de Bohr, no se pueden negar las influencias positivistas y antirrealistas que le son atribuidas a la interpretación estándar.

Con respecto a lo escrito anteriormente, se ha dicho que las posturas filosóficas tanto de Einstein como de Bohr no se pueden restringir a una sola postura de manera concluyente: primeramente, por los cambios de pensamiento que cada uno mostró a lo largo de su vida y, por otro lado, debido a los múltiples estudios de análisis que se han realizado respecto a sus posiciones filosóficas, los cuales han formado diversas lecturas al respecto.

A pesar de esto, es posible percatarnos de la oposición que surgió con respecto a la comprensión del significado sobre el que descansaría el formalismo matemático de la mecánica cuántica. A continuación, nos detendremos un poco en el argumento crítico que desarrollaron Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen, en el artículo publicado en 1935, que por las iniciales de cada uno de los apellidos de los autores se conoce como EPR.

Publicación de EPR y la paradoja del gato de Schrödinger

En el transcurso del año de 1935 se publicaron dos artículos que buscaban analizar y evidenciar algunas contradicciones o paradojas a las que se llegaba con la interpretación de Copenhague. El primero de ellos, el artículo de EPR, se publicó en mayo dentro de la revista *Physical Review*, con el título “¿Puede considerarse completa la descripción mecánico-cuántica de la realidad física?”⁸⁰. Ese artículo consistió en una propuesta para demostrar la incompletitud de la descripción que otorgaba la interpretación de Copenhague. El segundo artículo apareció en noviembre dentro de la revista *Die Naturwissenschaften*, con el título “El estado actual de la mecánica cuántica” y su autor fue el físico austriaco Erwin Schrödinger. Cabe señalar que en este último artículo apareció por primera vez el experimento mental en el que se despliega la famosa paradoja del gato de Schrödinger; no obstante, el contenido del artículo no se desenvuelve en torno a esta paradoja, pues el objetivo fue mostrar inconsistencias en el razonamiento de la interpretación ortodoxa y con el breve ejemplo del gato Schrödinger llevó consigo una de las características de los sistemas cuánticos, la superposición, en un objeto a nuestra escala.

Publicación de EPR

Los autores de EPR aceptaban el formalismo matemático que se había desarrollado pero se oponían a la interpretación que de él se derivó, en la que se observaba una paradoja entre dos de sus componentes fundamentales: la descripción dada a partir de la ecuación de Schrödinger y el postulado del colapso. A pesar de estas consideraciones, el contenido del artículo de EPR se restringe a mostrar la incompletitud de la mecánica cuántica y evidenciar la acción a distancia como resultado del postulado del colapso⁸¹.

El artículo se inicia presentando dos criterios: uno para estimar una magnitud física como real y el otro para valorar que una teoría sea considerada completa. Para Einstein y sus colegas, el criterio de completitud de una teoría consiste en que cada elemento de la teoría debe corresponder a alguna propiedad que coincida con la realidad, y para que una magnitud física sea considerada real debería cumplir el segundo criterio, el cual indica que

⁸⁰ El título original fue: “Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?”.

⁸¹ La siguiente descripción está basada del artículo EPR en su traducción al español: “¿Puede considerarse completa la descripción mecánico-cuántica de la realidad física?”. En Sánchez Ron, J. M. (2005) *Einstein*. Barcelona: Crítica.

sin alterar el sistema debe ser posible predecir con certeza el valor de esa magnitud física. Advierten también que la única vía para determinar los elementos de la realidad física son los experimentos y mediciones.

Siguiendo lo establecido por el principio de incertidumbre, en el que se indica que en la mecánica cuántica no es posible conocer de manera simultánea y precisa los valores de un par de magnitudes no conmutativas, como el momento y la posición, los autores de EPR presentan la situación en la que se quiere determinar la posición cuando ya se tiene el valor del momento. Indican que, frente a este ejemplo, se tendría que realizar una medición directa, pero al efectuar este tipo de medición se provocaría una perturbación y se alteraría al sistema: la partícula. Cuando se logre determinar la posición, el valor del momento perderá su precisión.

Frente a esta situación que caracteriza a la mecánica cuántica, los autores concluían que: (1) la descripción de la realidad que, según la mecánica cuántica, nos da la función de onda no es completa, o (2) cuando dos magnitudes físicas no conmutan, estas dos magnitudes no pueden tener realidad física de forma simultánea. No obstante, con la interpretación ortodoxa se asume que la función de onda sí contiene una descripción completa de la realidad física de algún sistema cuántico. (Einstein, A., Podolsky, B., Rosen; 2005, p. 514)

Para EPR, esta hipótesis aceptada por la interpretación de Copenhague entraba en contradicción con el criterio de realidad. Como ya hemos indicado, este criterio consistía en la “posibilidad de predecir una magnitud física con exactitud y sin alterar el sistema”. Para demostrar esto proponen el siguiente experimento mental:

Supongamos que tenemos dos sistemas, *I* y *II*, a los que permitimos funcionar en interacción mutua desde el instante $t = 0$ hasta el $t = T$, y suponemos además que, una vez más transcurrido este intervalo, ya no hay interacción entre ambas partes. Además, suponemos que se conocían los estados de los dos sistemas antes de $t = 0$. Entonces, con ayuda de la ecuación de Schrödinger, podemos calcular el estado del sistema combinado *I* + *II* en cualquier momento posterior; en particular para cualquier $t > T$. Llamaremos ψ a la correspondiente función de onda. Sin embargo, no podemos calcular el estado en que quedará cualquiera de los dos sistemas después de la interacción. Según la mecánica cuántica, esto sólo se puede hacer con ayuda de otras mediciones, aplicando un procedimiento conocido como el *colapso de la función de onda*. (Einstein, A., Podolsky, B., Rosen, 2005)

En otros términos, la propuesta consistió en pensar un sistema cuántico formado por dos partículas que en un primer momento interaccionan y después se separan. Esa interacción les permitiría vincular tanto sus coordenadas espaciales y también sus

momentos o impulsos, de manera que se produciría un enredamiento o entrelazamiento entre este par de partículas. A este sistema de dos partículas le corresponde una función de onda, y en el momento en el que se separan, cada una de ellas constituirá un subsistema. Ahora bien, en una primera medición de la partícula 1, obtenemos un valor, digamos para su posición, y en ese instante con la función de onda que corresponde al conjunto de las partículas 1 y 2, de acuerdo con el postulado del colapso, la partícula 2 también adquirirá un estado determinado para la misma magnitud, la posición. En una segunda medición a la partícula 1, esta vez para obtener el valor de su momento, de nuevo sucederá que la partícula 2 adquirirá un valor determinado para su momento. Con este ejemplo, EPR buscaba demostrar que es posible determinar con certeza y sin perturbaciones los valores para magnitudes conjugadas. Recordemos que para la interpretación de Copenhague, con el principio de incertidumbre, esto no se considera posible⁸².

Ahora bien, siguiendo el razonamiento de EPR se nos indica que, a partir del criterio de realidad postulado al inicio de su artículo, ambas magnitudes obtenidas a partir del ejemplo descrito deberán considerarse elementos de una misma realidad. Tras haber asumido que la función de onda sí ofrece una descripción completa de la realidad, y al haber demostrado con el ejemplo anterior que dos magnitudes conjugadas sí pueden tener realidad de manera simultánea, entonces se niega tanto (1) como (2). Recordemos que (1) indicaba que la descripción dada por la función de onda no era completa, y (2) cuando dos magnitudes físicas no conmutan no pueden tener realidad física simultáneamente. Teniendo esto presente, en EPR se concluye que la descripción dada por la mecánica cuántica basada en la función de onda no es completa.

En EPR se implican algunas concepciones que han motivado un mayor análisis tanto para físicos como para filósofos de la física; algunas de ellas pueden ser: el principio de localidad, la propuesta de variables ocultas y la concepción del realismo en la teoría.

De EPR se desprenden algunos razonamientos importantes. Veamos. Por un lado, en el momento en el que se mide la partícula 1 del sistema se produce una reacción instantánea en la partícula 2, el hecho de haber medido hace que la función de onda colapse, y a partir de ahí, se obtiene un valor para la magnitud que se haya decidido medir. En este sentido se supone una acción a distancia, en la que se implica que la velocidad de

⁸² Este principio señala que cuando se habla de magnitudes no conmutativas no es posible obtener el valor de ambas magnitudes de manera precisa y simultánea, y en este sentido no podrían tener realidad de manera simultánea.

intercambio de información, por llamarlo de alguna manera, entre ambas partículas es mayor a la velocidad de la luz. Con esto se violaría lo establecido en la teoría de la relatividad de Einstein, al tiempo que se transgrediría el principio de localidad, el cual nos indica, dicho a grandes rasgos, que cuando dos sistemas se encuentran separados a una distancia considerable o que cada uno es independiente del otro, no es posible que uno de ellos afecte de manera instantánea al otro⁸³. Siguiendo esta idea, siempre será posible recurrir a una cadena o secuencia de hechos que permitan explicar el movimiento de cierto objeto, pues será posible apelar a la acción de los objetos próximos⁸⁴. Para EPR, esta situación –la negación del principio de localidad en el sistema–, suponía que debe haber otros elementos de la realidad que todavía no son considerados por la teoría, lo cual refiere a la posibilidad de variables ocultas.

Para Mara Beller y Arthur Fine (1994), el argumento de la incompletitud de la mecánica cuántica en EPR, puede implicar dos posiciones: primero, la teoría puede ser completa a partir de las variables ocultas y sin cambiar los presupuestos básicos y las predicciones estadísticas; esta idea se propone brevemente al finalizar el artículo de EPR y posteriormente Einstein la desarrollaría en otras publicaciones. En una segunda posición, se sugiere que la mecánica cuántica no es la última teoría de los objetos microscópicos y que eventualmente puede ser superada por una teoría que contenga a la mecánica cuántica como un caso límite.

De manera breve, las interpretaciones que descansan en el supuesto de variables ocultas niegan que la función de onda pueda describir de manera completa un sistema, pues ella no proporciona toda la información de las propiedades físicas de un sistema, por lo que demandan variables adicionales que completen una perspectiva determinista al estilo de la física clásica.

Poco después de haberse publicado EPR, Bohr y Rosenfeld, que en ese momento trabajaban juntos, se dedicaron a elaborar una respuesta para EPR, la cual fue publicada en *Physical Review* en octubre de ese mismo año. En ese escrito se mostraba una defensa para la escuela de Copenhague, y se centraba en la “solidez”, la “racionalidad”, la “falta de

⁸³ La formulación de Einstein es la siguiente: se refiere a que el estado de cosas de un sistema (S_1), localizado en cierto espacio, es independiente de otro sistema (S_2), de tal manera que lo que ocurra en el sistema S_1 no influirá en el sistema S_2 . (Einstein, 1946. En Schlipp, 1970, p.85)

⁸⁴ Por ejemplo, si queremos explicar el movimiento de una pelota, apelamos a que su movimiento se originó por el contacto que esta tuvo con otro objeto, el cual pudo haber sido el empuje con una mano. Aunque es importante aclarar que “proximidad” no implica contacto.

contradicción” y la “consistencia” de ésta. Las siguientes líneas son un fragmento del escrito:

Sin embargo, tal argumentación no parece adecuada para afectar la solidez de la descripción de la mecánica cuántica, que se basa en un formalismo matemático coherente que cubre automáticamente cualquier procedimiento de medición como el indicado. La aparente contradicción de hecho revela sólo una insuficiencia esencial del punto de vista ordinario de la filosofía natural para una explicación racional de los fenómenos físicos del tipo que nos ocupa en la mecánica cuántica. (En: Beller, M., Fine, 1994)

A pesar de la crítica desarrollada por EPR, no se observó un mayor interés por parte de los físicos sino hasta los años sesenta, cuando fue retomado y se realizaron varios análisis del caso, que dieron como resultado varias investigaciones en las que se examinarían los fundamentos de la teoría (Kragh, 2007). Uno de ellos fue el artículo del físico irlandés John Stewart Bell (1928-1990), quien demostró cómo el experimento mental expuesto en EPR podría convertirse, realmente, en un experimento físico. Argumentó, en oposición a EPR, que “ninguna teoría física de variables ocultas locales puede reproducir todas las predicciones de la mecánica cuántica”. (Cushing, 2003, p. 324)

Paradoja del gato de Schrödinger

Veamos ahora el famoso experimento mental que Schrödinger describe en su artículo de 1935. Este ejercicio surgió a partir del intercambio de correspondencia entre él y Einstein; en ella discutían sobre las implicaciones del artículo EPR. Se ha dicho que, a través de esa correspondencia, Einstein sugirió a Schrödinger el planteamiento de una paradoja a través de un ejemplo en el que se usó un “barril de pólvora inestable”. Sin embargo, Schrödinger prefirió mostrar tal paradoja a través de la vida o muerte de un gato. La descripción del experimento mental que Schrödinger desarrolló en 1935 fue la siguiente:

Se encierra un gato en una cámara de acero, acompañado del siguiente dispositivo diabólico (que se debe proteger de toda interferencia directa del gato): en un contador Geiger hay una cantidad mínima de una sustancia radiactiva, tan pequeña que quizá en el curso de una hora uno de los átomos se desintegre, pero quizá también, con la misma probabilidad, ninguno lo haga. Si ocurre se produce una descarga en el tubo del contador y mediante un interruptor se libera un martillo que hace pedazos una pequeña ampolla con una solución de ácido cianhídrico. Si se abandona el sistema a su suerte durante una hora, se dirá que el gato permanece vivo siempre y cuando no se haya desintegrado ningún átomo. La primera desintegración atómica lo envenenaría. La función del sistema en su conjunto lo expresaría incorporando en ella al gato vivo y al gato muerto (perdonen la expresión) mezclados o dispersos a partes iguales [...] Es típico de estos casos que una indeterminación inicialmente

restringida en el dominio atómico se convierta en una indeterminación macroscópica, que luego puede ser resuelta por la observación directa. Eso nos impide aceptar de manera ingenua como válido un "modelo borroso" para representar la realidad. En sí, eso no tendría nada de confuso ni contradictorio. Hay una diferencia entre una fotografía movida o desenfocada y un cliché representando nubes o una capa de niebla. (Schrödinger, 1983)

La problemática de este experimento aparece cuando consideramos lo siguiente: tenemos que el gato es representado por una función de onda, la cual puede ser escrita $\psi = \psi_v + \psi_m$, donde ψ_v significa que el gato está vivo y ψ_m que el gato está muerto. Siguiendo a la Interpretación de Copenhague, el gato no está ni vivo ni muerto, sino que se encuentra en un estado intermedio, o bien, en una superposición de estados hasta que se abra la caja y sea observado. En ese instante, cuando es observado, la función de onda colapsaría a ψ_v o ψ_m . La cuestión aquí, de acuerdo a la postura de Einstein que escribió a Schrödinger en 1950, no es el estado del gato después de ser visto, sino la descripción dada al sistema completo y reconocer la "realidad intrínseca del gato" (Brush, 1980); situación que el mismo Schrödinger esboza en su artículo: "La modificación brutal inducida por la medida [...] es el punto más interesante de toda la teoría. Se trata precisamente del punto que impone la ruptura con el realismo ingenuo. Precisamente por esta razón no se puede reemplazar el modelo o la cosa real directamente por la función de onda". (Schrödinger, 1983)

En esta cita podemos observar la disconformidad de Schrödinger respecto al papel que juega la medición u observación, que para él significaba un distanciamiento con una postura realista, e implicaría el carácter idealista en la Interpretación ortodoxa.

Años más tarde, el físico Eugene Wigner (1902-1995) propuso otro experimento mental similar al de Schrödinger, pero esta vez incluyó en el arreglo experimental, o en el sistema, a un observador: el amigo de Wigner. El papel de este personaje consiste en responder por la condición del gato, su respuesta podría afirmar o negar la vida del gato después de abrir la caja y verlo. La dificultad radica en que este personaje, al ser parte del sistema, antes de haber sido cuestionado por el estado del gato, éste también se encuentra en un estado de superposición, al igual que el gato y los átomos de la sustancia radioactiva. Los estados superpuestos corresponden a suponer que el gato vive y a suponer que el gato ha muerto, antes de observar la caja.

Ante esta situación, la medición del sistema tendría lugar cuando se le hiciera la pregunta al amigo y él respondiera. Pero como el amigo pertenece al sistema, y para Wigner es necesaria la presencia de un sujeto consciente que determine el estado del

mismo, añade a otra persona que se encontrará fuera del sistema, y ella será la que determine el estado final. Esta conclusión, dado que involucra la conciencia, ha desembocado en malentendidos hacia la física cuántica y ha provocado interpretaciones erróneas que examinaremos en el próximo capítulo.

Retomando el artículo de Schrödinger, es importante señalar que en el momento en que se publicó no suscitó gran debate, sino hasta los años setenta, cuando, por cierto, la paradoja del gato se hizo tan popular que llegó a plasmarse entre las camisetas de algunos estudiantes (Kragh, 2007). Hoy en día podría decirse que permanece con tal reputación, pues para quienes no están relacionados con la teoría se logra una asociación, al menos de designación, entre la física cuántica y la paradoja del gato de Schrödinger. A diferencia de EPR, la paradoja del gato solamente se ha calificado como un argumento para mostrar lo imprecisa e ininteligible de la interpretación de Copenhague.

Es difícil clasificar a Schrödinger dentro de la postura que defendía Einstein, o bien, Bohr, ya que su pensamiento expresado a través de sus publicaciones se trasladaba de un lado a otro dibujando cierta ambigüedad, lo que dificulta colocarlo en una corriente específica. Dicha situación, como hemos visto, también se presentó en el pensamiento de Einstein y Bohr. De acuerdo a Arana (2001), Schrödinger “no acepta el realismo ingenuo de Einstein, pero tampoco el principio de complementariedad de Bohr, ni las evidentes pero superficiales consideraciones de Heisenberg sobre la interacción del sujeto y el objeto en los procesos de medición”; no obstante, sí es posible afirmar su desaprobación hacia la interpretación de Copenhague.

Al considerar lo expuesto a lo largo de esta sección, las diferencias entre las posturas de Bohr y Einstein, se obtiene que no se trata de un capítulo cerrado; hoy en día sigue presente, pues continúan apareciendo estudios desde la propia física, hasta estudios históricos y filosóficos en los que se analizan los argumentos de Bohr y la posición de Einstein frente a la interpretación ortodoxa de la mecánica cuántica. Asimismo, hay que mencionar que actualmente no hay duda sobre el éxito predictivo con el que cuenta la mecánica cuántica, pero como hemos visto quedan preguntas abiertas sobre sus fundamentos e interpretación. Una de las discusiones que aún se presenta tiene que ver con el problema de la medición que a continuación esbozaremos rápidamente para mostrar la importancia que tiene su análisis y la relevancia que tendría incluirlo, en cierto nivel, dentro de los trabajos divulgativos.

Introducción al problema de la medición

Con la interpretación de Copenhague se aceptó que las descripciones dadas a través de la mecánica cuántica se deberían circunscribir solamente a lo que se observa, a lo que se obtiene a partir de las mediciones, y se abandona, en cierto sentido, el análisis causal de los fenómenos a nivel atómico. Por otro lado, también se descarta la idea de preguntarse por variables faltantes –variables ocultas– que posiblemente pudieran proveer una teoría completa. En las secciones anteriores ya hemos aludido a algunos rasgos del problema de la medición, pero aquí nos detendremos un poco más para observar qué tipo de interrogantes surgen de él.

Conviene reiterar que el aparato matemático de la mecánica cuántica está conformado por dos elementos: el primero, la ecuación de Schrödinger, la cual permite calcular la función de onda (ψ) de manera determinista y describir los cambios continuos, lineales y causales de un sistema cuántico⁸⁵. Con la regla de Born se postuló que la función de onda (ψ) proporcionaría las probabilidades de los diferentes estados permitidos en un sistema. Como segundo elemento tenemos el postulado del colapso, que se presenta al realizar alguna observación o medición; es indeterminista e instantáneo. El postulado del colapso nos indica que en el momento de realizar una medición u observación se obtendrá uno de los estados permitidos dados por la función de onda. En otras palabras, las propiedades del sistema en cuestión adquieren un valor determinado en el momento en el que se miden, sin embargo, antes de la observación o medición de la propiedad que se busca calcular, pudiendo ser la posición, tiene valores difusos, por decirlo de alguna manera, pues si consideramos que se quiere obtener la posición de un electrón solamente obtendremos sus probabilidades. Este salto no es explicado por la interpretación de Copenhague y parece una elección *ad hoc*, pues no está descrito en la ecuación de Schrödinger y tampoco se trata de un fenómeno físico.

Ambos elementos, la ecuación de Schrödinger y el postulado del colapso, como pilares de la Interpretación de Copenhague parecen ser opuestos. Por un lado, parece que el postulado del colapso acierta en el momento de la medición, pero la dinámica que ofrece la ecuación de Schrödinger se equivoca; por otro lado, la dinámica es acertada mientras no se realice alguna medición. Aquí tenemos que la Interpretación ortodoxa cuenta con dos

⁸⁵ Esto es: se describe la evolución temporal del sistema por medio de una ecuación diferencial.

reglas de evolución temporal de origen diverso; debido a esta inconsistencia se han generado diversas críticas.

Frente a lo anterior, las preguntas que surgen son las siguientes: ¿cuándo y en qué forma se produce este colapso? ¿Cómo el colapso puede estar en concordancia con la dinámica que ofrece la ecuación de Schrödinger? ¿Cómo la mecánica cuántica, con su principio de superposición, puede ser compatible con el hecho de que al realizar una medición se obtiene un resultado definido? (Albert, 1994; Allahverdyan, A., et.al., 2013; Okon, 2014).

Al adentrarnos en la literatura de la filosofía de la ciencia, en particular en textos de filosofía de la física, se percibe un acuerdo general sobre la existencia de un problema central en la interpretación ortodoxa de la cuántica, el cual se trata del problema de la medición. Sin embargo, como advierte Tim Maudlin (1995), tal acuerdo parece disolverse cuando se intenta describir a profundidad en qué consiste el problema. Una de las razones a señalar sería que, dentro de la misma teoría, la propia noción de medición no es definida formalmente (Okon, 2014). A pesar de la falta de esclarecimiento para delimitar el problema de la medición, sí es posible distinguir las líneas generales que se persiguen en este problema; esto nos permitirá ilustrar la relevancia que tiene para la comprensión de la naturaleza en la escala microscópica.

En la física clásica el instrumento de medición no altera significativamente los resultados de la medición, dado que los intercambios energéticos a nivel macroscópico, a nuestra escala, se pueden ignorar. En este sentido, la descripción del sistema físico se dice objetiva porque la medición de cualquier estado no depende, de manera importante, de las condiciones de la medición. En cambio, en el mundo a escala microscópica cuando se realiza alguna medición, el sistema cuántico a estudiar interactúa con el aparato de medición (Allahverdyan, A., et.al, 2013), por lo que las condiciones de observación juegan un papel importante al verse involucradas en dicho proceso⁸⁶.

Cabe señalar que, a pesar de su importancia para la comprensión del funcionamiento de la teoría, este tipo de preocupaciones difícilmente se ven plasmadas en los libros de texto de mecánica cuántica. Teniendo en cuenta esto, los estudiantes en el área se pueden enfrentar a cuestiones que tienen que ver con esta problemática, pero con dificultad se

⁸⁶ Recordemos que cuando se refiere a “condiciones de observación” nos referimos a las condiciones de medición, no a una persona que observa.

fomenta la discusión; hay quienes lo evitan sólo por considerar que no tiene implicaciones en la práctica y que se trata de un problema que no tiene solución. A esta postura muchas veces se le ha relacionado con el dicho “calla y calcula”, expresión con la que el físico David Mermin (1990) resume la postura de la interpretación ortodoxa. A pesar de esta actitud, no se trata de un problema olvidado; su importancia radica en su relación directa con los fundamentos de la teoría, y su análisis podría contribuir a clarificar la teoría y su entendimiento. Hoy en día se puede afirmar que existe un área dentro de la física cuántica dedicada a reflexionar sobre la teoría de la medición, como un intento de alcanzar una explicación física coherente.

Como se ha señalado desde el inicio de este capítulo, la interpretación de Copenhague no es la única que existe, sino que se han establecido otras interpretaciones que buscan dar respuesta al problema de la medición y mostrar una descripción coherente del mundo. Por mencionar solo algunas, existen la interpretación de Bohm, la interpretación de los muchos mundos y la interpretación estocástica.

En el siguiente apartado nos adentraremos en la selección de textos divulgativos que hemos venido presentando a lo largo de la tesis para observar en qué medida se consideran los puntos antes expuestos, y en particular, cómo muestra, si es que lo hacen, la problemática que radica en la acción de la observación o medición.

Presentación del papel del observador en textos divulgativos

Hasta este punto hemos presentado las características fundamentales de la interpretación de Copenhague, y cómo algunos de sus supuestos provocaron críticas de ciertos grupos en la comunidad de físicos. Por otro lado, también dimos cuenta de algunas preguntas vigentes en torno a los fundamentos de la teoría; sin embargo, ahora toca el turno de exponer cómo estos debates se plasman en los textos divulgativos.

Al igual que en las secciones anteriores, la exposición para presentar los textos divulgativos seguirá el orden cronológico en el que fueron publicados. En esta ocasión no nos detendremos mucho en el texto de Arthur Eddington *La naturaleza del mundo físico* (1927), pues en el momento en el que fue publicado todavía no se lograba entrever las discusiones relacionadas con los fundamentos establecidos por la interpretación de

Copenhague. Solamente observaremos algunas líneas relacionadas con las relaciones de incertidumbre de Heisenberg. Después de esto, nos trasladaremos a los siguientes textos divulgativos: *El Universo misterioso* de James Jeans; los cuentos “Snooker cuántico” y “La selva cuántica” de George Gamow; *La biografía de la física* también de Gamow, y *El carácter de la ley física* de Richard Feynman. Vayamos, pues, en ese orden.

La naturaleza del mundo físico (1928) de Arthur Eddington

Sabemos que Eddington dedica un capítulo de *La naturaleza del mundo físico* para mostrar las diferencias que se presentaron entre las descripciones dadas a partir de la física clásica y lo que se había desarrollado hasta ese momento en el terreno de la física cuántica. En 1927, cuando fue publicado el texto de Eddington, fue el año en el que tuvieron lugar las conferencias en la ciudad de Como, en Italia, y la quinta Conferencia de Solvay; en ambos eventos Bohr dio a conocer a la comunidad de físicos las bases que representarían a la interpretación de Copenhague.

No obstante, Eddington hace algunos comentarios respecto a la mecánica ondulatoria que ya había desarrollado Schrödinger, así como al principio de indeterminación que Heisenberg había planteado. Sobre la primera, Eddington menciona que es, advirtiéndole de que se trata de su propia postura, una especie de truco que ha sido funcional, pero que no podría considerarse como una teoría física. Él esperaba que se desarrollara una nueva teoría de los cuantos. (Eddington, 1938, p. 253)

Cuando expone de manera introductoria el principio de indeterminación, el cual considera epistemológico, hace referencias indirectas a los procesos de medición y al papel que juega la perturbación cuando se quiere observar la trayectoria de un electrón; para esto describe el experimento mental que se ha conocido como microscopio de Heisenberg⁸⁷. Después de presentar el experimento mental señala:

La descripción [de algún fenómeno de la naturaleza] no debe incluir nada que no sea susceptible de ser observado, pero sí mucho de aquello que aún no está observado. Virtualmente necesitamos un ejército numeroso de observadores y medidores. A cada instante observan y miden todo lo que puede ser medido, aplicando métodos cuyo empleo nosotros mismos podemos concebir y emplear. Todo lo que miden entra a formar parte de la descripción del mundo científico. (Eddington, 1938, p. 260)

⁸⁷ Ha sido descrito en el apartado titulado: “Presentación de la concepción de Indeterminismo cuántico a través de los textos divulgativos” o puede consultarse en: Eddington, 1938, p. 257.

Eddington también se cuestionó sobre la completitud de una descripción sobre el mundo y formuló la pregunta: “¿qué es lo que corresponde considerar como una descripción completa del mundo científico?”. Para responder, él mismo señala que se deben cumplir los siguientes criterios:

1. No debemos hacer intervenir nada que no tenga relación causal entre lo carente de sentido (ejemplifica con la velocidad a través del éter) y nuestra experiencia.
2. No podemos limitar la descripción a los datos inmediatos de nuestras propias observaciones espasmódicas.
3. La descripción no debe incluir nada que no sea susceptible de ser observado, pero sí mucho de aquello que aún no está observado. Virtualmente se necesitará un ejército numeroso de observadores y medidores, teniendo esto en cuenta, todo lo que se pueda medir formará parte de la descripción completa del mundo científico. (*sic*) (Eddington, 1938, p. 260).

El Universo misterioso (1930) de James Jeans

En este texto, al igual que en el de Eddington, se alcanza a exponer la mecánica ondulatoria de Schrödinger y las relaciones de incertidumbre de Heisenberg, e indica que el modelo basado en ondas, hasta ese momento, ha resultado útil para predecir el comportamiento de los electrones; asimismo, advierte que probablemente el modelo de ondas es el adecuado para la descripción de todos los fenómenos del universo (James, 1930, p. 38). Sobre esto profundiza en su último capítulo titulado “Dentro de las aguas profundas”. Ahí inicia presentando una imagen del universo como si éste fuera una “burbuja de jabón” cuya superficie se encuentra marcada de irregularidades y ondulaciones, y cuyos ingredientes se pueden distinguir e interpretar como las radiaciones y la materia. Indica que, desde la postura de Heisenberg y Bohr, el carácter ondulatorio es considerado como “una especie de representación simbólica de nuestro conocimiento” (James, 1930, p. 108); de esta manera, cuando se toma en cuenta nuestro conocimiento, Jeans indica que esta representación se vuelve en gran medida subjetiva, circunstancia con la que no está totalmente de acuerdo. A diferencia de la postura de desconfianza que tenía Eddington para la mecánica ondulatoria de Schrödinger, James Jeans indica que este modelo “es fiel a la naturaleza” (Ibíd., 1930, p. 110).

Con respecto al principio de indeterminación de Heisenberg hace dos advertencias. Primero avala que este principio está presente en los fundamentos de la naturaleza, pues gracias a él se observa que no es posible obtener mediciones de la naturaleza absolutamente exactas, lo que implicaría el reemplazo del determinismo por

probabilidades y el abandono de la idea de una causalidad estricta. Segundo, indica que parte del principio de incertidumbre se podría considerar de naturaleza subjetiva, pues la imposibilidad de especificar con una precisión absoluta algunas propiedades del electrón se debe a “la torpeza del aparato de medición con el que se trabaje” (Ibíd., 1930, p. 24) y no a la realidad última de la naturaleza.

Al estudiar estos dos textos divulgativos, el de Arthur Eddington y James Jeans, observamos, en primer lugar, que dentro de su contenido no se exponen los principios que se le confirieron a la interpretación ortodoxa, esto debido al momento histórico en el que fueron publicados: alrededor de esos años, la estructura matemática de la mecánica cuántica tenía poco de haberse desarrollado, por lo que el proyecto de interpretar al formalismo apenas se estaba desplegando. Al considerar esto, advertimos que, segundo: las exposiciones de ambos autores sólo llegan a plantear la reciente mecánica ondulatoria de Schrödinger y las relaciones de incertidumbre introducidas por Heisenberg, para lo cual expresan algunos puntos de vista personales y conjeturan sobre el posible significado de estos argumentos.

La física nueva y los cuantos (1937) de Louis de Broglie

Veamos ahora *La física nueva y los cuantos* de Louis de Broglie. En este texto hay un capítulo para abordar la interpretación probabilística de la mecánica cuántica; en él nos detendremos un poco. Desde el punto de vista de De Broglie, el carácter probabilista de la teoría se trata de una propiedad que “es adoptada por todos, hasta por aquellos que la creen provisoria y que no han renunciado a la esperanza de volver un día a concepciones más clásicas”. (De Broglie, 1941, p. 209)

Para De Broglie, esta interpretación aparece como la única posible, pues advierte que ninguna de las tentativas hechas hasta ese momento que buscan dar otro sentido a la teoría han tenido éxito, señalando su propia experiencia como un intento fallido al toparse con dificultades insuperables en su búsqueda de otro tipo de interpretación (De Broglie, 1941, p. 215). Hay que señalar que, en un primer momento, De Broglie intentó construir una teoría determinista para explicar su propuesta de la dualidad onda-partícula de la materia, pero después del Congreso Solvay de 1927 se convirtió en un adherente de la escuela de Copenhague. Más tarde, en 1952, volvió a la creencia en una descripción causal de la naturaleza. (Cushing, 2003, p. 321)

En una primera sección de ese capítulo De Broglie señala un par de postulados fundamentales, que de acuerdo con él funcionan como base para una teoría coherente. El primero de ellos lo llama “el principio de cuantificación” y con él se fijan los valores posibles de una magnitud; el segundo es el “principio de descomposición espectral generalizado”, al cual De Broglie refiere como “las probabilidades respectivas de los diferentes valores posibles de una magnitud mecánica unida a un corpúsculo del cual se conoce a la onda son proporcionales a los cuadrados de las amplitudes de los componentes correspondientes en la descomposición espectral de la onda según las funciones propias de la magnitud considerada” (De Broglie, 1941, p. 213). Con estas citas observamos que el lenguaje del físico francés podría resultar un tanto técnico para quienes no están relacionados con la física.

De manera breve, con estos postulados De Broglie apunta al carácter probabilístico de la cuántica: el primero hace referencia al único valor que puede tomar cierta magnitud antes de realizarse alguna medición; el segundo postulado nos señala los valores probables que puede tomar una magnitud al ser medida. Para señalar esto, De Broglie presenta una analogía diciendo que “la función de onda golpea el dispositivo de medida, [después de esto] la función de onda se descompone en una serie de funciones con los valores posibles de la magnitud a medir”. Dicho esto, el autor muestra que las relaciones de incertidumbre son, por una parte, una “consecuencia necesaria de la probabilidad de hacer corresponder al estado de un corpúsculo una cierta onda asociada y por otra, de los principios generales de interpretación probabilística”. (Ibíd., 1941, p. 218)

El discurso de Louis De Broglie continúa con la exposición del carácter probabilístico que adopta la teoría e intenta mostrar en qué sentido se ha de considerar necesario, y señala en un principio que las probabilidades son necesarias al describir el curso o la evolución de los fenómenos elementales. Para especificar esta idea, introduce lo que él llama “la ecuación de propagación”, la cual permitirá calcular con exactitud la evolución de la función de onda durante todo el periodo en el que no se produzca alguna observación o medida; de esta manera se obtendrá la probabilidad de encontrar tal o cual valor, en cualquier instante, para cualquier magnitud unida al corpúsculo. Sin embargo, menciona que cuando se realice alguna medición se obtendrán nuevos conocimientos en donde las probabilidades antes establecidas cambiarán. (Ibíd., 1941, p. 225).

Para De Broglie, en ninguna circunstancia es evidente que una operación de medida revele pura y simplemente el estado preexistente: “puede suceder que la operación de

medida tenga por resultado crear un estado nuevo extrayendo del estado preexistente una de las posibilidades contenidas en él” (Ibíd., 1941, p. 210). Para el autor es preciso tratar de formular qué papel juega el acto de medir dentro de los fenómenos microscópicos.

El físico francés muestra cómo las relaciones de indeterminación juegan un papel relevante para los postulados que indica al inicio de la sección, por lo que las relaciones de Heisenberg las ha de considerar como principio para la interpretación de la teoría.

En la sección final del capítulo, De Broglie hace una presentación de la noción de complementariedad, la cual califica como una idea curiosa desde el punto de vista filosófico (Ibíd, p. 228), pero también indica que dicha idea es resultado de las relaciones de incertidumbre.

Como vemos, el autor indica las consecuencias que se generan cuando se realiza alguna medición, en el que se percibe una transición entre resultados, que va desde los resultados probabilísticos hasta obtener “nuevos conocimientos” después de haber hecho la observación o medición. Hay que señalar que a través de las explicaciones dadas por De Broglie no hay referencia directa al postulado del colapso, no utiliza ese término, pero sí se percibe que éste se encuentra tácito. Otro punto por rescatar es la invitación que hace para formular de manera precisa el papel de la medición; sin embargo, a través del texto no hace un mayor cuestionamiento al respecto. También es destacable la inclinación y aceptación que el autor tiene hacia la interpretación probabilista, señalándola desde las primeras líneas como “la única posible”, evadiendo, de cierta manera, las implicaciones que de ella se derivan.

“Snooker cuántico” y “El safari cuántico” (1940) de George Gamow

“Snooker cuántico” y “El safari cuántico” son cuentos que están incluidos en *El nuevo breviario del Señor Tompkins* (1940). En el primer cuento Gamow hace imaginar un experimento en el que se pretende determinar la trayectoria de una partícula a partir de un método mecánico. El arreglo experimental se describe de la siguiente manera:

Para este fin, [se] puede[n] idear dispositivos de registro mecánico minúsculas, como unas campanillas colocadas en resortes que registren la presencia de cualquier cuerpo material que pase junto a ellas. Podría colocar un gran número de esas campanillas en todo el espacio por donde se espera que pase el cuerpo en movimiento, sabiendo que el “sonido de las campanillas” indicará sucesivamente la trayectoria de la partícula. En física clásica ella [se refiere a una científica] podría hacer que las campanillas fueran tan pequeñas y sensibles como

lo deseara, y en el caso límite de un número infinito de campanillas infinitamente pequeñas, la noción de trayectoria podría determinarse también con cualquier grado de precisión deseado. Sin embargo, las limitaciones cuánticas para sistemas mecánicos volverán a estropear la situación. Los badajos de las campanillas están dentro del espacio encerrado en la propia campana. Por lo tanto, sólo tendrán ciertos estados discretos de energía permitidos. Si las campanillas son demasiado pequeñas, la cantidad de impulso que necesitan absorber del cuerpo en movimiento para que el badajo las haga sonar será grande, y en consecuencia, el movimiento de la partícula sufrirá una perturbación proporcionalmente grande. Por otra parte, si las campanillas son grandes habrá poca perturbación, pero la incertidumbre de cada una de las posiciones registrada será grande. La trayectoria final deducida será de nuevo ¡una franja mal definida! (Gamow, 2009, p. 141-142)

Como vemos, Gamow indica que las limitaciones cuánticas impedirán determinar la trayectoria. Con el anterior experimento mental el autor intenta mostrar, de manera general, el proceso de medición para los sistemas cuánticos, en donde no es posible determinar de manera simultánea los valores precisos para la posición ni para la trayectoria exacta.

Más adelante, el personaje del señor Tompkins se encuentra en un bar, en donde hay una mesa de snooker –una variante del juego de billar– y se acerca para observar el juego. La primera impresión que tuvo Tompkins fue que la bola que había sido golpeada por el taco “empezaba a esparcirse en la mesa”, y conforme más se movía más imprecisa se volvía, pero en el momento en que la bola choca con otra, ambas “salen despedidas en diferentes direcciones al mismo tiempo”. Este comportamiento se trataba de un ejemplo de ondas de probabilidad, aclaración que realizó el personaje del profesor de física. De acuerdo con el profesor, estas ondas provocaban que la posición de las bolas sobre la mesa no esté bien definida. Ante esto, el señor Tompkins le pregunta al profesor “¿está en realidad físicamente en todos esos lugares al mismo tiempo?” y el profesor responde “tal vez sí, tal vez no”, y le indica que la “interpretación de la física cuántica siempre ha sido un tema de debate. No hay consenso al respecto ni siquiera en la actualidad”. (Gamow, 2009, p. 146)

El profesor continúa su discurso y explica al señor Tompkins que la situación de no poder definir cantidades se debe en última instancia a que “fundamentalmente” esas cantidades son indefinidas.

En la siguiente historia titulada “El safari cuántico” se describe un viaje a la selva cuántica:

Iremos a la selva cuántica [...] –Tendrán que alquilar un elefante que nos lleve. –No podemos cabalgar un animal que va a esparcirse por todas partes. *Mencionó el profesor.* Tenemos que estar sujetos a algo pesado. Así, el momento tendrá un alto valor, aunque vayamos despacio... y así, cuanto mayor sea la masa, menor será la incertidumbre. Por eso las leyes cuánticas no han sido observadas en el mundo ordinario... La incertidumbre de la posición de un elefante cuántico sólo puede percibirse mediante una inspección atenta. Podemos esperar que su contorno parezca un poco borroso, pero nada más. Cuando se internaron en la selva, *sobre el elefante*, el señor Tompkins notó que las hojas de los árboles vibraban, aunque al parecer no soplaban el viento.

Le preguntó al profesor por qué sucedía esto. –Oh, es porque las estamos mirando – fue la respuesta. [...] La cuestión es que al hacer cualquier observación es inevitable perturbar el objeto que está siendo observado– ¿Y si nadie estuviera mirando? –preguntó– ¿Todo se comportaría entonces correctamente? Quiero decir, ¿las hojas se comportarían en la forma en que ya sabemos? –¿Quién podría decirlo? –repuso el profesor–. Si nadie está mirando, ¿quién puede saber cómo se comportan? –¿Quiere usted decir que esta cuestión es más filosófica que científica? –Si lo desea, puede usted decir que es filosofía, pero en realidad es simplemente una pregunta sin sentido. Si algo está claro, por lo menos en la ciencia, es el principio fundamental según el cual *nunca se debe hablar de las cosas que no pueden ser demostradas en forma experimental*. Toda la teoría de la física moderna se basa en ese principio [...] Para el físico moderno, lo único que tiene significado es lo que se conoce como los “observables”, es decir, los resultados de mediciones, como la posición y el momento. (Gamow, 2009a, p. 159-171)

En las dos historias se puede observar que el autor hace señalamientos sobre algunas características fundamentales de la física cuántica, como las perturbaciones que se generan cuando se realiza una medición u observación; la imposibilidad de definir ciertas magnitudes; el papel que juegan las ondas de probabilidad, y la incertidumbre. No obstante, en pocos espacios se hace alusión a las controversias que están implícitas en esas características. En un primer momento, el personaje del profesor indica los debates a los que está expuesta la interpretación de la teoría sin profundizar en dicha declaración. Por otro lado, en el segundo cuento el personaje del señor Tompkins lanza algunas preguntas “filosóficas” al profesor, y éste las considera “preguntas sin sentido”, para la física. De esta manera, observamos que Gamow da algunas señales de las dudas que surgen en algunos aspectos de la teoría, pero no procede a presentar con más detalle las implicaciones que éstas acarrearán.

Biografía de la física (1961) de George Gamow

Ahora pasaremos al capítulo “La ley de los cuantos” que se encuentra dentro del libro *Biografía de la física*, también de George Gamow. En ese apartado, el autor dedica algunas páginas para explicar las relaciones de incertidumbre. Señala cómo los instrumentos de

medición causan perturbación en los sistemas atómicos que se busca medir, y añade: “el observador y sus instrumentos se convierten en parte integrante del fenómeno que se investiga”. Después procede a describir un experimento mental desarrollado por Heisenberg para determinar la trayectoria de un electrón e ilustrar las ideas mencionadas atrás. Cabe señalar que la descripción que realiza es muy similar a la que utiliza en el cuento “Snooker cuántico”, con la diferencia que el lenguaje utilizado en este texto es un poco más técnico. Dice que la conclusión a la que llegó Heisenberg fue que los movimientos y sucesos individuales de “los electrones no están firmemente predeterminados, sino que se mueven bajo la guía de ondas, entre márgenes que serían como las trayectorias de la mecánica clásica pero ensanchadas”. Señala que lo importante es que “esa guía se realiza en una manera estocástica más bien que rigurosamente determinista”, y que por principio no es posible obtener mediciones exactas de la posición y velocidad simultáneamente. (Gamow, 2010, p. 335)

Dentro del texto, el físico ruso se detiene a plantear algunas preguntas que cuestionan los fundamentos, y al mismo tiempo, desarrolla las respuestas. Una de las preguntas que presenta es: “¿es la función de onda que guía la trayectoria de una partícula material una “entidad física” definida que *existe* en el mismo sentido que existen los átomos de sodio o un proyectil cohete internacional?”; para dar respuesta a esto, hace una distinción en la manera de comprender el concepto de “existencia”, escribiendo lo siguiente:

La respuesta depende de lo que se quiere decir con la palabra «existencia». Las funciones de onda «existen» en el mismo sentido que las trayectorias de los cuerpos materiales. Las órbitas de la Tierra o de la Luna en torno a la Tierra «existen» en el sentido matemático de que representan el continuo de puntos ocupados consecutivamente por un cuerpo material en movimiento. Pero «no existen» en el mismo sentido que la vía férrea que guía el movimiento de un tren. En particular, la función de onda no tiene masa, no siendo más que una trayectoria difuminada. (Gamow, 2010, p. 336)

Más adelante, Gamow indica que el principio de incertidumbre fue desarrollado por Heisenberg y Bohr bajo una nueva filosofía de la física, que “reclamaba un cambio profundo en nuestras ideas sobre el mundo material, ideas que adquirimos en la experiencia ordinaria desde la infancia. Pero permite dar sentido a muchos rompecabezas de la física atómica” (Ibíd., 2010, p. 337). Advierte que hubo grupos que repudiaron las nuevas ideas y señala a Einstein como uno de los que no aceptaron este principio; además, subraya el debate que surgió en el Sexto Congreso de Solvay en 1930 entre Einstein y Bohr, y muestra el experimento mental desarrollado por Einstein y la respuesta de Bohr. El autor señala que

la postura de este último fue la que venció. En el texto le dedica mayor espacio para mencionar, en cierta medida, algunas de las preguntas que surgieron en el desarrollo de la teoría cuántica; sin embargo, tales menciones no se desarrollan y Gamow deja clara su postura.

El carácter de la ley física (1965) de Richard Feynman

Continuemos con la sección de “Probabilidad e incertidumbre. La visión de la naturaleza a través de la mecánica cuántica”, que podemos encontrar dentro de *El carácter de la ley física* de Richard Feynman.

La descripción del experimento de la doble rendija representa el esqueleto sobre el que se desarrolla este capítulo del libro de Feynman⁸⁸. Ahí se describe qué sucede con este experimento cuando se usan partículas o balas, y qué sucede cuando se realiza con ondas; indica que en tal experimento se encuentra “el misterio de la mecánica cuántica, las paradojas, los misterios y las peculiaridades de la naturaleza”. Antes de comenzar con las descripciones de los experimentos advierte que no se debe insistir en la pregunta “¿cómo es posible?”, pues los lectores se encontrarán con un “callejón del que nadie ha conseguido salir todavía. Nadie sabe cómo es posible”. En esa publicación encontramos la popular frase: “creo que puedo decir con toda tranquilidad que nadie entiende la mecánica cuántica”.

A partir de la descripción de estos experimentos Feynman muestra el comportamiento dual de las partículas, la perturbación que se genera en el proceso cuando se introduce luz para intentar ver a las partículas y de allí desarrollar el principio de incertidumbre, en el que afirma que los procedimientos experimentales no pueden ser tan precisos como se quisiera. Señala que ante este principio o ley nadie ha conseguido escapar y se trata de “una característica básica de la naturaleza, extensiva a todos los casos posibles” (Feynman, 2005, p. 158). Más adelante advierte que puede aparecer la pregunta “¿qué mecanismo subyace tras todo esto?”, a la cual, indica, nadie conoce la respuesta, y nadie puede dar una explicación del fenómeno más profunda que las descripciones que él desarrolla en el experimento de la doble rendija.

⁸⁸ La reproducción de este experimento se podrá encontrar en el APÉNDICE C de este trabajo de investigación.

Debido a que la explicación última radica en el cálculo de probabilidades, Feynman expresa que la duda que puede surgir es si “las probabilidades se encuentran hasta en lo más profundo, [es decir], si las leyes fundamentales de la física son de carácter probabilístico” (Ibíd., 2005, p. 160). Frente a ello, el autor hace mención de la posición que se tiene desde la teoría de variables ocultas, pero declara que “no es nuestra ignorancia de los mecanismos internos y sus innumerables complicaciones lo que hace que la naturaleza parezca tener carácter probabilístico. Parece ser algo intrínseco a ella”. (Ibíd.)

Con lo anterior observamos que en la exposición de Feynman se alude a algunas preguntas que surgen al intentar comprender lo establecido por la mecánica cuántica, pero ante todas las cuestiones apunta que se trata de características intrínsecas a la naturaleza; con ello, permite percibir su inclinación hacia una de las interpretaciones de la teoría, la interpretación de Copenhague.

Comentarios sobre la representación del papel del observador a través de textos divulgativos

Considerar el papel del observador y de los instrumentos de medición en esta investigación cobra importancia por ser un tema que muestra una relación muy estrecha con los fundamentos de la física cuántica, en vista de que si se realiza una indagación sobre ellos se cuestionan supuestos claves considerados por la interpretación de Copenhague, interpretación que ha tenido la mayor difusión tanto en libros de texto como en trabajos divulgativos. No obstante, en la mayoría de las publicaciones de estos géneros, en específico dentro de las publicaciones divulgativas, no se ofrece una descripción completa en la que se haga mención de las complicaciones que se encuentran en los fundamentos de la teoría, situación que puede provocar en los lectores una comprensión limitada sobre sus alcances, en la que parece que se muestra una imagen de una teoría acabada con cimientos inmutables.

Como hemos mencionado, en los libros de texto difícilmente encontramos la problematización de la interpretación, y por consecuencia, no se advierte de las problemáticas implicadas al examinar el significado otorgado al acto de observación o medir; a pesar de ello, tal situación no significa que los estudiantes e interesados en el tema no se hayan topado con interrogantes que desemboquen en tal problemática. Este perfil

podría ser el público meta para la divulgación de la física cuántica en la que se establezcan los debates fundamentales de la teoría.

Al rastrear cómo se expone el papel de la observación en los textos elegidos, encontramos que sí hay referencias a él, pero que las exposiciones otorgadas pueden caer en falsas interpretaciones por parte del lector, así mismo, se pueden generar extrapolaciones del concepto y su significado, a tal punto de ser relacionado con el concepto de conciencia. Esta última idea se relaciona con trabajos divulgativos que han descontextualizado la teoría hasta presentar relaciones de la cuántica con ideas esotéricas; con ello se ha promovido una divulgación que se puede considerar, en cierto sentido, pseudocientífica. Este tema lo abordaremos en el próximo capítulo: “Alcances y dificultades al transmitir la fundamentación conceptual de la física cuántica”.

De manera general, hemos observado que en todas las presentaciones se distingue el sentido de extrañeza o sorpresa que se derivó de las conclusiones a las que se llegaban con la nueva teoría. Por ejemplo, Eddington expresó inseguridad ante el principio de incertidumbre, pues lo consideró como un truco funcional (1938, p. 253); por su parte, Louis De Broglie (1941) utiliza un lenguaje más técnico para exponer el desarrollo de la teoría y sus postulados, y basa su exposición en la interpretación ortodoxa sin mostrar las debilidades en sus fundamentos. Por otro lado, hay quienes desdeñan la relevancia de cuestionar los fundamentos de la teoría, como lo hacen Gamow (2009a, p. 146) y Feynman (2005, p. 162). Es importante hacer notar que el contenido de cada una de las publicaciones también está en función de la situación en la que se encontraba el desarrollo de la teoría en el momento en que fueron publicadas. En las primeras publicaciones, alrededor de 1927 y 1930, difícilmente podrían presentar las discusiones que se presentaron durante la quinta y sexta Conferencia de Solvay, 1927 y 1930 respectivamente. En cambio, en las publicaciones más actuales, como vimos en el primer capítulo, se presentan algunos indicadores de las cuestiones filosóficas que presenta la teoría, pero se advierte que adoptan la posición ortodoxa para presentar la teoría al público lector, a veces mermando la importancia de estas cuestiones.

El problema de la medición es un asunto actual, discutido tanto por físicos especializados en el área, que atañe tanto a físicos teóricos como experimentales, y hasta filósofos de la física. El hecho de que dicha problemática sea considerada para presentarla en textos divulgativos responde, en primera instancia, a tener una comprensión más íntegra de lo que sucede en los fenómenos microfísicos y presentar cómo, a pesar de las

interrogantes que surgen de sus fundamentos, es considerada como una de las teorías más exitosas. Además, impulsaría una postura más crítica y promovería la indagación en aquellas personas que muestren un mayor interés en el tema. Por último, seguiría uno de los objetivos que se buscan en la actividad de comunicar ciencia: mostrar el proceder de la ciencia incluyendo sus vicisitudes.



CAPÍTULO 3

ALCANCES Y DIFICULTADES AL TRANSMITIR LA FUNDAMENTACIÓN CONCEPTUAL DE LA FÍSICA CUÁNTICA

La demarcación entre ciencia y pseudociencia
no es un mero problema de filosofía de salón;
tiene una importancia social y política vital.

Imre Lakatos (1989)

En cualquier actividad destinada a divulgar la ciencia se presentan dificultades al intentar exponer algún concepto o idea científica de la manera más genuina posible. Hemos visto que la divulgación consiste, desde una descripción clásica, en traducir el lenguaje científico a uno que sea compatible con el público receptor y comprendido por éste, evitando que en esa traducción se distorsione el significado original⁸⁹. Por otro lado, la actividad de divulgar no sólo se acota al proceso de traducción, sino que a través de ella también se busca recrear el proceso por el que pasan las conclusiones dadas por la ciencia, es decir, mostrar al público cómo es que se llega a tal conocimiento; se busca contar al público el contexto que está detrás del conocimiento científico incorporando su historia, los modos de proceder y hasta sus aspectos sociales, esto con la finalidad de que el público obtenga una visión más amplia del quehacer científico.

En cuanto a las publicaciones de divulgación, Lewenstein (2009) afirma que ellas son un espacio en el que se deposita aquel conocimiento que ya ha sido aceptado por la comunidad científica, este tipo de conocimiento Lewenstein lo llama “conocimiento estable”⁹⁰. Para Lewenstein, como para el historiador de la ciencia James Secord (2004), el discurso divulgativo contribuye a que el conocimiento cruce fronteras, dado que los trabajos de divulgación pueden ser retomados por comunidades distintas al círculo académico de donde surgió dicho conocimiento. Por ejemplo: un texto de divulgación sobre física nuclear podría ser leído tanto por otros especialistas en el área, por colegas de otras áreas o por quienes no cuentan con una formación científica pero tienen interés en el tema. En ese sentido, el conocimiento estable del que habla Lewenstein, traspasará la frontera del círculo académico a uno más amplio a través de la divulgación.

Podríamos aceptar lo anterior, pero no por ello es incuestionable: hay que tener presente que no todo lo que aparece bajo la clasificación de “divulgación científica” puede garantizar una transmisión y asimilación del “conocimiento estable”, a causa de diversos factores. Por una parte, porque existe cierto grado de libertad en la interpretación que el público pueda dar a la información proporcionada, situación que está en función del

⁸⁹ Recordemos que el proceso de traducción en la divulgación científica no se trata de una traducción textual, sino que la traducción implica un trabajo de comprensión del contexto del idioma o discurso original y de la comprensión del contexto del idioma al que se va a trasladar, en donde el traductor o divulgador sea capaz de seleccionar qué elementos del discurso original prevaleceran y qué elementos se pueden omitir sin perder el significado original.

⁹⁰ En este aspecto, hay que considerar el término de “conocimiento estable” de una manera un tanto informal, pues no se puede hacer una afirmación de tal dimensión debido a los cambios que se producen en la ciencia.

contexto en el que el sujeto se encuentre, es decir, por sus creencias y conocimientos previos. Otro factor es que dentro de la clasificación asignada como divulgación científica podemos encontrar textos en donde la ciencia presentada es tergiversada, situación que provoca la transmisión de ideas erróneas en relación con alguna ciencia. Lo anterior lo podemos percibir en algunos textos que se dicen ser divulgativos de la física cuántica.

Por ejemplo, recordemos la situación imaginaria que describimos en la introducción de la tesis, imaginemos que estamos en una librería en su sección de “Divulgación científica”, y en ese espacio encontramos una variedad de libros que en sus títulos muestran la palabra “cuántica”: *Curación cuántica*, *Manual de energía cuántica*, *Neurocuántica*, *Conexión cuántica*, entre otros. Si somos legos en el tema, podríamos suponer que esos textos nos ayudarán a comprenderlo. En un primer momento podríamos fiarnos ingenuamente de dichas publicaciones y su contenido, al pensar que el autor es veraz en la información que nos presenta –en este caso estaríamos apelando a la común falacia de autoridad–. Al considerar esta situación estamos frente a una problemática que concierne a la divulgación de esta ciencia, la cual se podría analizar a partir de la percepción por parte del público, así como desde el proceso que se sigue al crear el discurso de divulgación. La pregunta que resultaría desde un análisis de públicos sería: ¿cómo el público podría identificar cuáles son los trabajos de divulgación que presentan a la ciencia de manera veraz?; y, por otra parte, para quienes se dedican a divulgar la ciencia ¿cómo evitar transmitir ideas erróneas?, ¿cómo prevenir al público de las fuentes no confiables?; y en un sentido más fundamental, esta problemática también concierne a la filosofía: ¿cómo delimitar aquello que es ciencia de lo que no lo es?

Una de las características que sobresale cuando se divulga la física cuántica es que en esta disciplina encontramos nociones que se alejan de nuestro sentido común, con ideas que nos parecen extrañas y con planteamientos paradójicos. Esta condición de la teoría plantea dificultades para trasladar el significado de los conceptos a imágenes que permitan al público tener un entendimiento claro.

Como se observó en el capítulo anterior, algunas de las nociones que radican en los fundamentos de la teoría, –el comportamiento dual de los componentes mínimos de la materia, la característica indeterminista en los sistemas cuánticos y el rol que juega la observación al medir dichos sistemas– son ideas que chocan con los supuestos establecidos por la física clásica y que en su momento propiciaron discusiones entre los físicos fundadores en torno al significado ontológico y epistemológico que se le tendría que

otorgar. También advertimos que este tipo de discusiones se siguen presentando, en específico con el tema de la medición: aún no hay un acuerdo unánime sobre qué significado físico dar a los resultados que se proyectan desde el formalismo y lo obtenido con la evidencia experimental⁹¹.

Debido a la falta de claridad sobre el significado físico, o bien, sobre la interpretación de qué nos dice la teoría sobre el mundo, se han dejado algunas fisuras que son aprovechadas por aquellos que buscan justificar ideales místicos relacionados con religiones orientales (Dieks, 1996). Por ejemplo, recordemos que el papel del observador en la medición de un sistema cuántico es una noción que ha producido debates con respecto a su significado; en ese contexto, hay quienes consideran al “observador” como un elemento indispensable para obtener un resultado preciso en la medición; cuando se extiende esta idea hay quienes concluyen que la “mente del observador” juega cierto papel en el sistema cuántico. Quienes asumen esta idea, descrita de manera general, derivan que la existencia del mundo depende de la conciencia del observador, y así la realidad se convertiría en una construcción mental (Crease & Mann, 1987; Wigner, 1995). Dado lo anterior, han surgido críticas pues se introduce un carácter subjetivo a la física.

Lo anterior refleja un argumento que se ha difundido en algunos textos que comúnmente se etiquetan como “divulgación científica” por el solo hecho de que en esos escritos se dice que pretenden presentar la teoría cuántica a un público general. No obstante, en este tipo de publicaciones, como se ha mencionado en líneas atrás, las nociones o conceptos de la teoría son utilizados para justificar situaciones o ideas que el aparato teórico y matemático de la física cuántica no explica, es decir, se extrapolan los significados de los conceptos teóricos hacia temas que no tienen nada que ver con el campo explicativo de la teoría. Se podría afirmar que las extrapolaciones podrían no ser evidenciadas por los autores, a falta de un entendimiento claro de la teoría, y simplemente apelan a otras fuentes que arman vínculos con ideas místicas o mágicas: la relación entre conceptos como observador, conciencia y mente, etcétera. Este tipo de publicaciones, en las que se difunden dichos argumentos o ideas, no podrían estimarse como divulgación científica solamente por el hecho de apelar a conceptos procedentes de la ciencia, sino que habría que valorarlos como una “divulgación pseudocientífica”.

⁹¹ Cfr. 2.3 “Representación del papel de la observación en la mecánica cuántica o el problema de la medición a través de textos divulgativos”.

El significado del concepto de “divulgación”, como aquella actividad que se dedica a difundir el conocimiento científico a quienes no están relacionados con él⁹², dicho en líneas generales, pareciera oponerse al concepto de “pseudociencia”, por lo que la idea de “divulgación pseudocientífica” pudiera corresponder a un oxímoron, pues en dicha designación se conectan dos conceptos opuestos. A pesar de ello, aquí se ha optado por dicha denominación dada la apariencia de divulgación que muestran los discursos pseudocientíficos. En este sentido, también es relevante señalar que la distinción entre divulgación científica y divulgación pseudocientífica podría no ser evidente para algunos, como quienes no tienen un juicio formado del quehacer de la ciencia y sus implicaciones. En la última sección de este capítulo analizaremos el concepto de pseudociencia y su vínculo con la divulgación.

Es importante acentuar que este tipo de argumentos no es algo propio del medio escrito, hoy en día se difunden a través de diversos medios; es frecuente encontrar la difusión de estas ideas en publicidad, en radio, televisión, en conversaciones y en películas bajo la clasificación de “documentales”. Sobre esto último, Shermer (2001), divulgador de la ciencia interesado por la pseudociencia y el escepticismo científico, identifica a esas películas como “entertainmentary”, por ser un espectáculo de entretenimiento que simula ser un documental. Un ejemplo de ello es el filme de *¿Y tú qué sabes!?* (2004) en el que se mezclan nociones del funcionamiento del cerebro, filosofía y física cuántica. Entre las varias ideas que se exponen en el “documental” se afirma que la conciencia de un sujeto puede intervenir en la realidad física. Para llegar a tal afirmación se alude al problema del colapso de la función de onda en la física cuántica. En este sentido, se hace un mal uso de lo establecido por la teoría y a partir de ello, se concluyen afirmaciones falaces⁹³.

Por otro lado, también podemos encontrar que se ofrecen cursos, terapias alternativas, medicina cuántica, etcétera, que adaptan las ideas y conceptos de la teoría a su propio fin y muestran como fundamento a la física cuántica. Todo esto refleja que la difusión de ello es muy amplia y también que la propagación no sólo se queda en el ámbito

⁹² Cfr. PREÁMBULO, en donde se desarrolla el concepto de divulgación científica.

⁹³ Las ideas plasmadas en la película aparentemente están respaldadas por las participaciones de varios científicos pues aparecen fragmentos de sus entrevistas. Sin embargo, esto fue motivo de varias críticas pues hubo manipulación y edición de las entrevistas presentadas. David Albert, filósofo de la física que aparece como uno de los entrevistados, hizo notar que su participación fue editada para favorecer los argumentos que se presentan en la película. Declaró que “pasó cuatro horas explicando pacientemente a los cineastas por qué la mecánica cuántica no tiene nada que ver con la conciencia o la espiritualidad, sólo para ver sus declaraciones editadas y cortadas hasta el punto en que parece que él y el espíritu guerrero están hablando en una sola voz” (Mone, 2004).

teórico, por decirlo de alguna manera, debido a que son argumentos que se han adaptado a discursos en los que se implica algún servicio de salud como la “curación cuántica”. Basta con hacer una búsqueda en internet de esta terminología para visualizar la cantidad de entradas que se generan y que promocionan un “novedoso servicio” de “medicina alternativa”. Esta situación va más allá de una difusión de conclusiones falaces, pues se llega a comprometer la salud y economía de quienes son persuadidos con las ideas que aparentemente están justificadas científicamente. Frente a esto, se puede observar la importancia de evaluar este tipo de divulgación que se ha generado alrededor de la física cuántica.

Por lo dicho hasta aquí, en el presente capítulo nos remontaremos al contexto histórico en el que surgieron las primeras publicaciones divulgativas en las que se presentó una descontextualización de la física cuántica y en las que se vinculó a la teoría con ideas místicas provenientes de algunas religiones orientales. Observaremos también que ciertas ideas manifestadas por los propios físicos fundadores de la teoría han permitido que se establezcan este tipo de paralelismos, a pesar de ello, esto no significa que dichos vínculos estén validados o respaldados por la teoría. Posteriormente, hablaremos del *caso Sokal*, tomándolo como ejemplo para mostrar cómo en los grupos académicos también se hace presente la apropiación y abuso de ciertas concepciones de la física cuántica para apoyar argumentos que quedan fuera de su alcance explicativo. Por último, observaremos la problemática filosófica que existe para señalar los límites entre la ciencia y la pseudociencia, esta última entendida de manera general como el conocimiento falso que se esfuerza por pasar como ciencia; habiendo presentado lo anterior observaremos cómo esta dificultad se ha trasladado hacia la actividad de divulgar la ciencia y las implicaciones que conlleva.

3.1

Surgimiento de las primeras publicaciones divulgativas en las que se descontextualiza la física cuántica

Para responder a la pregunta ¿cómo fue que la física cuántica de pronto se vincula con cuestiones místicas en los textos de divulgación?, realizaremos una mirada retrospectiva hacia la segunda mitad del siglo XX, y nos detendremos en la década de los setenta. En este período David Kaiser (2011, p. 143), físico e historiador de la ciencia, sitúa el nacimiento de los textos en los que se presenta a la física cuántica asociada con aspectos místicos, hasta llegar al punto de tomar a la teoría como respaldo para persuadir al público de supuestos beneficios medicinales.

Los primeros textos que aparecieron en este periodo y que abordaron este tipo de relaciones fueron: *El Tao de la física* de Fritjof Capra (1975), *La danza de los maestros de Wu Li* de Gary Zukav (1979) y *Space-Time and Beyond* de Fred Alan Wolf (1982)⁹⁴. Estas publicaciones inspirarían una gran cantidad de textos similares.

Antes de detenernos en este tipo de publicaciones, haremos un rápido recuento histórico sobre la situación en la que se encontraba la ciencia física, enfocándonos en la física cuántica. Nos situaremos en la época de posguerra con la finalidad de comprender el contexto en el que surgieron dichos textos.

Contexto de la física en la época de posguerra

Al comenzar la Segunda Guerra Mundial (1939–1945) se presenciaron algunos cambios en distintos sectores de la sociedad, incluyendo a las comunidades científicas y académicas. El gremio de los físicos también se vio afectado, pues muchos se alejaron de sus investigaciones particulares para trabajar en proyectos armamentistas. Hubo quienes migraron desde Europa a Estados Unidos, como fue el caso de Einstein, quien se había establecido en Princeton desde algunos años atrás, en 1933, cuando el nazismo comenzaba

⁹⁴ Capra y Alan Wolf tenían formación en física teórica, el primero con doctorado por la Universidad de Viena en 1966 y Alan Wolf por la Universidad de California en 1963. Zukav no tuvo formación en el área, solamente mostró interés por el tema y fue asesorado por su compañero de piso Jack Sarfatti, físico teórico y miembro del Fundamental Fysiks Group, del cual hablaremos más adelante.

a manifestarse. Varios de los físicos que trabajaban en la mecánica cuántica se vieron afectados por los movimientos bélicos, lo que también provocó que cambiaran de lugar de residencia. A finales de la década de 1930 e inicios de 1940, los físicos cuánticos se habían dispersado: Schrödinger se establecería en Dublín, Born en Edimburgo, Niels Bohr, quien trabajaba en Copenhague, se trasladó a Suecia huyendo de la policía alemana, esto en 1943, y más tarde regresaría a Copenhague; en cambio, Heisenberg permaneció en la Alemania nazi. El periodo posterior a la Segunda Guerra Mundial cobra importancia por la estructura social y las posiciones políticas que surgieron, pues esas nuevas circunstancias repercutieron en el quehacer científico y, por ende, en la ciencia física.

Inmediatamente después de la guerra, la ciencia y los científicos fueron valorados en gran estima por parte de la sociedad⁹⁵. Durante la segunda mitad del siglo XX, los gobiernos estuvieron convencidos de que la inversión en la investigación científica tendría consecuencias favorables en el sector militar, lo que también significaba beneficios económicos y políticos. Con esta idea presente, la investigación académica y militar obtuvo apoyo económico por parte del gobierno. Esta situación se evidenció principalmente en Estados Unidos, donde el Estado, el sistema militar y las organizaciones privadas fueron las fuentes preponderantes de financiamiento para las universidades en ese país. De esta forma, y tomando una actitud pragmática, se incrementó el interés por la investigación en física de partículas de altas energías. Esa actitud en los físicos estadounidenses prevaleció en el periodo que abarcó la Guerra Fría (1945-1989,1991)⁹⁶.

Por otro lado, durante la Guerra Fría surgió la “carrera espacial”; una disputa que emergió en 1957, cuando la antigua Unión Soviética lanzó el primer satélite enviado al espacio exterior, el Sputnik. Este hecho también contribuyó a que el gobierno estadounidense aumentará el apoyo económico para las áreas relacionadas con la física y el desarrollo de tecnología aeroespacial.

En este contexto, la divulgación de la ciencia también se vio favorecida, pues aumentaron los apoyos para este tipo de actividades, lo que permitió que la ciencia se trasladara a otras áreas de la cultura pública y colocarse en el discurso público. A este fenómeno se le ha identificado como *boom de la divulgación* dentro del área de la

⁹⁵ El historiador Daniel J. Kevles relata de manera detallada cómo fue la vida de aquellos que se dedicaron a la física durante esta época: *The Physicists. The History of a Scientific Community in Modern America*, Harvard University Press: New York.

⁹⁶ En 1989 fue la caída del muro de Berlín y en 1991 se presentó un golpe de estado en la URSS, ambos eventos se han señalado como el fin de la Guerra Fría.

comunicación de la ciencia (Lewenstein, 1987, 2009; Turney, 2007). Éste se vio reflejado en un aumento generalizado de productos de divulgación científica. La divulgación en la física, por ejemplo, experimentó un aumento en popularidad, posicionándose en revistas y programas de televisión, así como en publicaciones editoriales dirigidas a un gran público⁹⁷.

Ante esta circunstancia, surgirían preguntas relacionadas con el grado de independencia del conocimiento científico con respecto al contexto social y económico en el que se desarrollan. (Kragh, 2007, p. 286; Kaiser, 2011, p. 15; Longino, 2016, p. 6)

Con relación a la postura que tomaron los físicos en la academia, se percibió que en las universidades adoptaron una actitud pragmática con la que buscaban resultados funcionales, tomando distancia del compromiso filosófico que alguna vez se percibió con los físicos fundadores de la teoría cuántica. En palabras de Kaiser (2011, p. 12), la actividad de los físicos de posguerra consistía en calcular y no en “soñar con viejas filosofías”; se guiaron, pues, por la estructura curricular de las universidades, la cual había sido diseñada para reforzar las habilidades de cálculo y evitar los aspectos filosóficos que permitían reflexionar sobre el significado del comportamiento de la naturaleza.

Por otro lado, la percepción de estima por parte de la sociedad hacia la ciencia en general que se había observado justo después de la guerra se fue desvaneciendo. En el momento en el que comenzaron a vislumbrarse problemas vinculados con temas ambientales y cuestiones nucleares, la actitud del público frente a la ciencia se tornó ambivalente, había quienes la apoyaban y había quienes la criticaban fuertemente.

Este cambio de concepción de la sociedad hacia la ciencia en general, incluyendo por supuesto a la física, se dice que fue favorecido por la percepción que dejó la guerra de Vietnam (1955-1975) en la sociedad estadounidense, en donde comenzaron a emerger concepciones y protestas antimilitaristas, y además, se emprendieron manifestaciones de inconformidad respecto a la energía nuclear, situación que fue extrapolada como inconformidad hacia los científicos (Kaiser, 2011, p. 385; Kragh, 2007, p.22)

El privilegio del que gozaba la ciencia física se vio golpeado alrededor de 1968 y 1972. Los políticos y la administración pública comenzaron a cuestionarse los beneficios que otorgaba la ciencia a la sociedad. Auditorías realizadas en el Departamento de Defensa en Estados Unidos provocaron grandes recortes al presupuesto en investigación básica,

⁹⁷ Este fenómeno del *boom* se observó en Inglaterra unos años más tarde. El apogeo de la divulgación de la ciencia en este país fue mayormente visible en la década de 1990, entre otras razones, por la promoción que se tuvo por parte de algunas instituciones inglesas y por parte de las editoriales, quienes consideraban a la ciencia un gran negocio. Ese auge fue disminuyendo al inicio del siglo XXI. (Leane, 2007, p. 42)

situación que afectó directamente a los departamentos de física en las universidades y, por ende, a quienes se encontraban estudiando la licenciatura o el posgrado, quienes al concluir se tenían que enfrentar a un mercado laboral en descenso, lo que también provocó una disminución en el número de estudiantes matriculados en esas disciplinas. (Kaiser, 2011, p. xv)

En la siguiente gráfica, si nos enfocamos en el periodo de 1940 a 1980 se puede observar el comportamiento de apogeo y descenso del número de matriculas de estudiantes de doctorado en el área de la física.

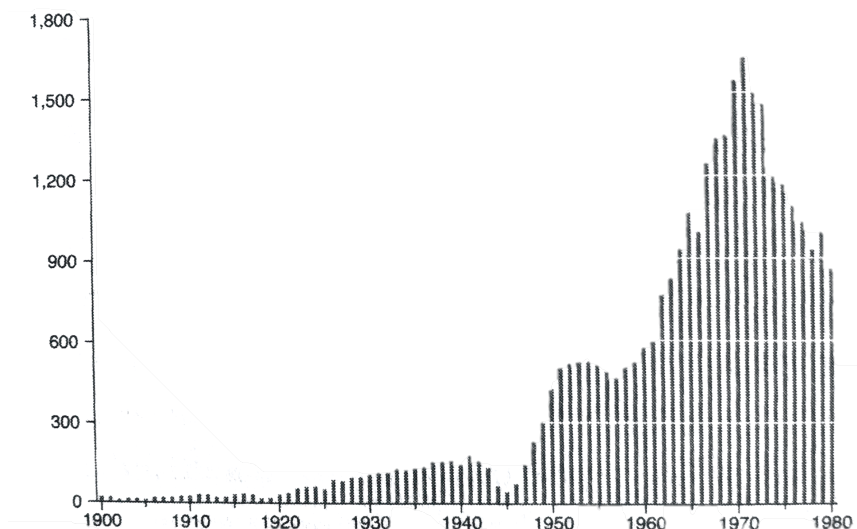


Fig. 2.

Número de estudiantes de doctorado matriculados en física en Estados Unidos, entre 1900 y 1980.

Gráfica tomada de Kaiser (2011, p. 23); ilustración de Alex Wallerstein, basada en datos del "American Institute of Physics" y "National Science Foundation".

En la gráfica anterior se observa que antes del inicio de la Segunda Guerra Mundial (1939), el número de estudiantes matriculados en doctorado mostraba un ligero aumento de manera constante. No obstante, entre 1940 y 1945 hay un descenso notable, y en la segunda mitad de la década de los cuarenta se percibe un aumento considerable que se prolonga hasta los primeros años de 1970, década en la que comenzó a disminuir la cantidad del alumnado.

Como hemos visto, todo lo anterior se reduce a la situación de la física en Estados Unidos. Dicha situación no se replicó en Europa, debido a las condiciones sociales, políticas y económicas en las que se encontraba después de la Segunda Guerra Mundial; en esa

región del mundo se enfrentaron a los desafíos de la reconstrucción después de los episodios bélicos. En este sentido, hay que recordar que varios de los físicos que se habían formado en Europa habían migrado a Estados Unidos a causa de la guerra y se habían incorporado a alguna institución científica o académica de ese país; de este modo, les tocaría experimentar lo que hemos descrito.

Considerar lo anterior servirá como telón de fondo para acercarnos al contexto próximo de la publicación *El tao de la física*, uno de los primeros textos “divulgativos” en el que se plantean asociaciones entre algunas ideas de la física cuántica con ideas provenientes de religiones orientales, el cual tuvo un gran éxito y alentó a otro gran número de autores. En la siguiente sección hablaremos de este texto.

Fritjof Capra en el Fundamental Fysiks Group y la publicación de *El Tao de la física*

Como se mencionó en la sección anterior, la investigación en física durante la época de posguerra en las universidades de Estados Unidos se tornó pragmática, y en la rama de la física cuántica se dejaron de lado las preocupaciones y discusiones derivadas de analizar el significado físico del formalismo.

Ante la inexistencia de espacios para debatir los fundamentos de la física cuántica y el trasfondo del aparato matemático, se organizaron grupos de discusión marginales a las materias establecidas por los planes de estudio de licenciatura y posgrado. Uno de estos grupos fue el Fundamental Fysiks Group, organizado en 1975 en Berkeley. En las reuniones de este grupo se llegaron a discutir, de manera insistente, ideas en las que se relacionaban conceptos de la física cuántica con ideas provenientes de religiones orientales.

Tengamos en cuenta que, en la década de los setenta, en Estados Unidos surgieron agrupaciones de hippies y movimientos New Age⁹⁸. Se les identificaba con esa etiqueta a quienes perseguían ciertos ideales: adoptaban una postura en contra de las decisiones políticas tomadas en aquel momento, además se caracterizaban por el gusto de probar nuevas experiencias a través del consumo de sustancias psicodélicas muy en boga por

⁹⁸ Movimiento contracultural que emergió como una mezcla entre la posición antibélica y la espiritualidad hippie de los sesenta en Estados Unidos y Europa. Al no estar satisfechos con las normas y creencias occidentales mayoritarias, ofrecieron otras interpretaciones de la ciencia, la historia y la religión.

aquellos años. La mezcla de estos dos movimientos coexistía en una sociedad que se mostraba receptiva y escasa de crítica. (Kaiser, 2011)

Los asistentes a las reuniones del Fundamental Fysiks Group fueron abiertamente identificados como hippies. Además de las particularidades ya dichas, el grupo se distinguió por organizar conferencias y hacer publicaciones en las que mezclaron conceptos de la física cuántica con el misticismo oriental, así como por temas relacionados con la conciencia, la lectura psíquica de la mente y lo paranormal.

En la época en la que comenzaron a reunirse en Berkeley, el apogeo del apoyo gubernamental para promover la formación en ciencias básicas y en física ya había pasado. En ese momento se percibía una disminución en el presupuesto y también en la matrícula estudiantil. A pesar de las circunstancias desfavorables el grupo logró obtener apoyo económico a partir de otras instancias. (Kaiser, 2011, p. 21)

Uno de los integrantes más representativos del Fundamental Fysiks Group fue Fritjof Capra (1939 -), quien después de haberse graduado en Viena, en 1966, se trasladó a Santa Cruz, en California, para trabajar en un posdoctorado en la Universidad de California y después se movió al Laboratorio Lawrence en Berkeley. Durante su estancia en Berkeley, en sus clases de escritura, conoció a Elizabeth Rauscher, George Weissman, Fred Alan Wolf y Jack Sarfatti, miembros fundadores del Fundamental Fysiks Group. La relación de amistad entre ellos permitió que en mayo de 1975 se incorporara a las reuniones del grupo. En esos encuentros, Capra les habló de su nuevo libro que estaba a punto de ser publicado, *El Tao de la física*, en el cual mostraba relaciones que él identificaba entre la mecánica cuántica y el misticismo oriental, idea que interesaba a los integrantes del grupo.

Las ideas plasmadas en ese libro tienen su origen a partir de una experiencia que Capra vivió durante su estancia en Santa Cruz, situación que es descrita por el propio autor en las primeras páginas de *El Tao de la física*. Él indica que vivió una poderosa experiencia al estar sentado en la playa de Santa Cruz en 1969:

[...] fui consciente de que todo lo que me rodeaba parecía estar enzarzado en una gigantesca danza cósmica. [...] «vi» cascadas de energía que llegaban del espacio exterior, en las que las partículas eran creadas y destruidas siguiendo una pulsación rítmica; «vi» los átomos de los elementos y los de mi cuerpo participando en aquella danza cósmica de energía; sentí su ritmo y su sonido, y en ese momento supe que aquélla era la Danza de Shiva". (Capra, 2012, p. 20).

Capra menciona que a partir de ese acontecimiento le siguieron otras experiencias similares, por lo que comenzó a registrar lo que iba descubriendo, advirtiendo las analogías entre la física moderna y el misticismo. En 1970, Capra tuvo que regresar a Europa, y gracias

a uno de sus contactos consiguió un espacio para trabajar en el Imperial College en Londres. Aunque no contaba con alguna posición académica ni ingreso económico alguno, dedicó su tiempo a estudiar seriamente los textos orientales y comenzó a elaborar un esquema de libro de texto, con la intención de que éste fuera publicado y se convirtiera en una fuente de ingresos que le permitiera facilitar su postulación a un puesto de profesor en el futuro.

Al tener listos los primeros capítulos del libro, Capra pidió consejo a Victor Weisskopf (1908-2002) quien, en aquel momento, ya era un físico reconocido y era considerado como un exitoso divulgador de la ciencia⁹⁹. Además de pedirle una revisión del contenido, Capra le solicitó ayuda para facilitar su publicación y la posibilidad de un pago anticipado. No obstante, la respuesta de Weisskopf no fue la esperada, pues le indicaba que la publicación de un libro de texto no era una opción rentable, sugiriéndole que el contenido se enfocara en las analogías entre la física cuántica y el pensamiento oriental que habían sido motivadas por su experiencia en Santa Cruz. De esta manera, Capra volvió a esquematizar su idea de libro, pero ahora incorporando las nociones del misticismo oriental. (Kaiser, 2011, p. 152)

Cuando Capra comenzó a buscar editoriales para que le publicaran el texto recibió varios rechazos, no obstante, un par de pequeñas editoriales, una en Inglaterra y la otra de Estados Unidos, le aceptaron el proyecto y lo publicaron. Este suceso marcaría el comienzo de su camino hacia el éxito, si este último es valorado a partir del número de ventas que obtuvo, pues llegó a catalogarse como un Best Seller.

Como bien señala Kaiser, la combinación de varios factores fueron los que permitieron que este libro fuera bien recibido por la sociedad y alcanzara una amplia demanda. Primeramente, la formación en física con la que Capra contaba le permitió tener un contenido científico claro, además de que las secciones destinadas a presentar la física, que en principio formaban parte del borrador para el libro de texto, habían sido revisadas y respaldadas por Victor Weisskopf, quien actuó como una figura de apoyo y de autoridad. Por otro lado, su discurso relacionado con las filosofías orientales estaba respaldado por las investigaciones que había realizado durante su estancia en Londres. Por último: el contexto en el que se publicó el libro, a mediados de 1970, una época en la que en varios círculos sociales prevalecía una mentalidad positiva hacia el New Age. En ese periodo se observó un incremento en publicaciones religiosas, y un crecimiento del poder político de los fundamentalistas religiosos, situación que se vería reflejada en algunos libros de ciencia

⁹⁹ La popularidad que alcanzó fue gracias a su publicación *Knowledge and Wonder: The Natural World as Man Knows it*, la cual fue publicada en 1962 alcanzando grandes ventas.

populares, en los que se mostraban ciertos mensajes de carácter espiritual que parecían contrarrestar los ideales de racionalidad (Crease & Mann, 1987; Kaiser, 2011; Lewenstein, 2009). Con la combinación de estos factores se definiría el mercado ideal para el consumo del libro de Capra.

Cabe señalar que la difusión del texto no se limitó al público lego o a las audiencias interesadas en el tema que no contaban con alguna formación en física, sino que el texto alcanzó las aulas universitarias, pues llegó a considerarse material bibliográfico en algunos cursos. Por otro lado, también fue revisado por varias publicaciones académicas, donde recibió una gran cantidad de reseñas, análisis y críticas; hubo quienes lo elogiaron por considerarlo una buena introducción general a los conceptos de la física moderna, y hubo otros que lo descalificaron por extraer citas fuera de contexto para justificar supuestos paralelismos. (Ibíd., 2011, p. 158-161)

Después de la publicación de Capra se percibió una oleada de textos similares. Uno de ellos fue el libro *La danza de los maestros* de Gary Zukav, que a diferencia de Fritjof Capra, no contaba con una formación profesional en física, pero mostraba un gran interés por las posibles relaciones de la física moderna con la conciencia. Zukav fue compañero de departamento de Jack Sarfatti, miembro fundador del Fundamental Fysiks Group, quien lo invitó a participar en las reuniones y asistir a un taller de “Física y conciencia”. Estas experiencias motivaron a Zukav para redactar su texto, el cual fue revisado y guiado por Sarfatti, quien sí contaba con una preparación profesional en física. Lo que Zukav buscaba con ese texto era introducir a los lectores a una forma particular de interpretar el desarrollo de la física moderna, evitando los tecnicismos y las matemáticas. Una de sus intenciones en el texto fue mostrar cómo el papel del observador en la mecánica cuántica se puede considerar como un participante, y en este sentido, para Zukav, la física se había convertido en una rama de la psicología, o al revés. Afirmaba que la física cuántica había destrozado la ilusión de una objetividad.

El texto de Zukav, al igual que el de Capra, resultó ser un éxito en ventas. Logró varias reimpressiones en sus primeros cuatro años y recibió el reconocimiento American Book Award en 1980; además, en 2001, la editorial Harper Collins sacó una edición especial como parte de su colección Perennial Classics (Kaiser, 2011, p. 142).

Otros de los textos que aparecieron con esta oleada fue *Taking the Quantum Leap: The New Physics for Nonscientists* (1981) del físico Fred Alan Wolf ¹⁰⁰ y *God and the New Physics*, publicado en 1984 por el físico inglés Paul Davies. Cabe señalar que Alan Wolf perteneció al grupo de Fundamental Fysics Group, y su publicación también ganó el premio American Book Award, el mismo que obtuvo Zukav, esta anotación nos da luz sobre la popularidad o número de ventas que obtuvo. Por otra parte, Paul Davies ha sido reconocido por sus trabajos dirigidos a un público general en los que habla sobre cosmología, astrobiología, vida extraterrestre y en las que conecta a la ciencia con la religión, por ello fue premiado con el Templeton Prize, otorgado por la fundación que lleva el mismo nombre y que promueve la intersección entre ciencia y religión.

Con lo que hemos visto hasta aquí podemos afirmar que las publicaciones que surgieron del Fundamental Fysics Group propiciaron el surgimiento de un nuevo tipo de publicaciones populares, en los que se combinaban características de la física moderna con ideas de la contracultura. Para Kaiser (2011) con esas publicaciones no solamente se introduciría un nuevo género en los libros, sino que se desdibujaron los límites entre géneros, entre los libros de divulgación y los libros de texto, tal como se observó con *El Tao de la Física* de Capra.

Sin embargo, a diferencia de la consideración de Kaiser sobre el surgimiento de un nuevo género de publicaciones en el que no se distinguen los límites entre los géneros de divulgación y libro de texto, me parece que hoy en día no quedan claros los límites entre las publicaciones divulgativas y esa nueva clasificación que surgió a partir del texto de Capra. Es decir, cómo clasificar aquellos textos que se dicen ser de divulgación científica pero que, en su contenido, además de presentar conceptos referentes a la ciencia, muestran ideas entremezcladas que pertenecen a otro orden de conocimiento o creencias, ideas que no son estudiadas por la ciencia ya que no permiten evidencia empírica y no cuentan con suficiente soporte o entendimiento teórico.

En el presente trabajo se les ha clasificado como divulgación pseudocientífica debido a que en ellas no se distinguen los límites de lo que pertenece a la ciencia y lo que no. En secciones posteriores de este capítulo retomaremos esta designación.

¹⁰⁰ Fred Alan Wolf (1934 -), además de sus trabajos editoriales, ha participado en varios filmes, a veces catalogados como documentales, en los que difunde argumentos en los que mezcla los conceptos provenientes de la física con el misticismo, una de sus participaciones aparece en la película *¿Y tú qué sabes?!* (2004).

3.2

Representación de las relaciones establecidas entre la física cuántica y el misticismo oriental

En este apartado examinaremos el texto de Capra para mostrar el tipo de vínculos que él establece entre la física cuántica y el misticismo oriental. Nos enfocaremos en la descripción que el autor hace cuando habla del rol de la observación en el momento de realizar alguna medición en algún sistema cuántico.

La manera de proceder del autor para mostrar una serie de analogías entre la teoría cuántica y las ideas procedentes de religiones orientales es presentar, en primera instancia, las explicaciones que se derivan de la teoría, acompañándolas de algunas citas de los físicos fundadores de la misma: Bohr, Heisenberg, Schrödinger, entre otros. Además, toma fragmentos de físicos que fueron referencia para el grupo Fundamental Fysics Group, como Henry Stapp, David Bohm y John Wheeler. Después de presentar las ideas de los físicos, Capra señala las similitudes que supuestamente existen entre los conceptos de la teoría y los planteamientos de las religiones orientales, apoyándose en esta segunda fase de la presentación de citas de los textos místicos.

Antes de continuar, es importante señalar que la presentación de Capra está basada en la interpretación de Copenhague, indicación que el propio autor escribe. Asimismo, hace una breve mención sobre la falta de un “modelo metafísico claro” o, en otros términos, de la falta de una interpretación que esté aceptada de manera unánime, así como la falta de resolución de sus problemas filosóficos implicados. Tomando esto en cuenta, debemos considerar que el lector lego tendrá una exposición de la teoría cuántica desde los referentes de la interpretación ortodoxa. Las mayores referencias de Capra hacia esta interpretación están dirigidas a la idea de complementariedad de Bohr y a la noción de “observador”, los cuales considera elementos fundamentales de la teoría.

Para iniciar el apartado donde expone las analogías, Capra atribuye una supuesta unificación de las religiones orientales y los elementos básicos de la física moderna para la interpretación del mundo:

Aunque las tradiciones espirituales que he descrito difieren en muchos detalles, su visión del mundo es esencialmente la misma [...] Un hindú y un taoísta tal vez acentúen diferentes aspectos de la experiencia; un budista japonés quizá interprete su experiencia en unos términos

muy diferentes de los que utilizaría un budista hindú pero los elementos básicos de la cosmovisión desarrollada en todas estas tradiciones son los mismos. Estos elementos también parecen ser los rasgos fundamentales de la cosmovisión que emerge de la física moderna. (Capra, 2012, p. 178)

Indica que es el concepto de “unidad” el que subyace tanto en estas religiones y la física moderna; además, asegura que desde la visión de las religiones orientales, la “unidad” es experimentada con la meditación, y que también ella se puede advertir en la física cuántica:

La unidad básica del universo no sólo constituye el rasgo central de la experiencia mística, sino también ha resultado ser una de las más importantes revelaciones de la física moderna. Se hace ya aparente a nivel atómico y se manifiesta cada vez más a medida que profundizamos en la materia dentro del mundo de las partículas subatómicas. (Capra, 2012, p. 179)

Para Capra, el proceso de observación en las mediciones de los sistemas cuánticos es la forma en que se manifiesta esa “unidad”. Para él, la “unidad” se deriva de la idea de que, para conocer un sistema microscópico, o medirlo, ese sistema siempre mostrará una conexión con los aparatos de medición y, en última instancia, con quien observa. Se trata, pues, de un “conjunto unificado” entre el sistema microscópico y el sistema macroscópico, y para él ese “conjunto unificado revela la interconexión existente en el universo”. Para justificar esta idea, alude a una cita de Bohr:

Las partículas materiales aisladas son abstracciones, y sus propiedades son definibles y observables sólo a través de su interacción con otros sistemas. (Bohr, 1934, p. 57. En Capra, 2012, p. 187)

Seguido de ello, recoge otra serie de citas, tanto de físicos como de textos del misticismo oriental, con las cuales pretende mostrar las analogías entre las ideas presentadas y concluir que tanto en el misticismo oriental como en la física atómica “se habla de un entretrejo en el que siempre se incluye al observador humano y a su conciencia” (Ibíd., p. 179). En ese sentido, la conciencia del observador será el final de la cadena en el proceso de medición. Con lo anterior, según Capra se presentaría una oposición con el supuesto de objetividad que subyace en la física clásica.

Con lo visto hasta aquí podemos advertir que Capra configura sus argumentos mezclando proposiciones que pertenecen a diferentes tipos de razonamiento; por un lado, muestra los razonamientos por parte de los físicos, los cuales buscaron dar cuenta de la naturaleza microscópica a partir de la teoría y por otro, nos muestra los discursos provenientes de creencias en el campo de la espiritualidad. No hay que olvidar que lo único

que hace es mostrar paralelismos entre ideas. Esta situación no significa que lo que está afirmando este justificado por la teoría, ni tampoco muestra mayores evidencias para respaldar sus argumentos, sino que solamente está alentando una creencia respecto a las aparentes similitudes.

Continuemos con otro ejemplo de la exposición de Capra. En la siguiente cita vemos cómo presenta en qué consiste la medición y cómo este acto “afecta” los objetos cuánticos:

Las mediciones son interacciones que originan «sensaciones» en nuestra conciencia –por ejemplo, la sensación visual de un destello de luz, o de una mancha oscura sobre una placa fotográfica-, y las leyes de la física atómica nos dicen con qué probabilidad un objeto atómico dará lugar a una determinada sensación si permitimos que interactúe sobre nosotros. (Capra, 2012, p. 191)

Recoge, posteriormente, una cita de Heisenberg para “mostrar” que lo establecido por la ciencia está en correlación con nosotros y la naturaleza:

Las ciencias naturales no describen y explican la naturaleza simplemente, sino que forman parte de la interacción existente entre la naturaleza y nosotros mismos [...] El mundo aparece, entonces, como un complicado tejido de acontecimientos, en el cual las relaciones de diferentes especies se alternan, o se superponen y se combinan, determinando de este modo la textura de la totalidad. (Heisenberg, 1963, pp. 75-96. En: Capra, 2012, p. 190)

Al presentar lo anterior, Capra reitera al lector la importancia que tiene el observador en los procesos de medición de los sistemas cuánticos; para ello, retoma una expresión hecha por el físico John Wheeler, quien propuso reemplazar el término «observador» por el de «partícipe»¹⁰¹ (Capra, 2012, p. 192-193). Capra menciona que al aceptar la propuesta de Wheeler se podría evidenciar con mayor claridad la correspondencia con las ideas místicas, pues “la idea de «participación» es bien conocida por cualquier estudiante de misticismo”, al tratarse de un concepto muy utilizado en las filosofías orientales.

Capra señala que para obtener un conocimiento místico es indispensable la “participación de todo nuestro ser [...] hasta un punto en el que el observador y lo observado, el sujeto y el objeto, no sólo son inseparables, sino que llegan a hacerse

¹⁰¹ La cita que Capra recoge de Wheeler es la siguiente: “En este principio cuántico, nada es más importante que esto, pues destruye el concepto del mundo como «algo exterior», donde el observador está aislado de él por una gruesa placa de cristal de 20 centímetros. Incluso para observar un objeto tan minúsculo como un electrón, tendrá que destruir el cristal. Tendrá que penetrar e instalar su equipo de medición. A él le correspondería decidir si medirá la posición o el momento. Instalar el equipo para medir lo uno impide y excluye su instalación para medir lo otro. Además, la propia medición varía y modifica el estado del electrón. El universo nunca será ya el mismo. Para describir lo que ha ocurrido, se hace necesario borrar la vieja palabra «observador» y colocar en su lugar la de «partícipe». En cierto extraño sentido, el universo es un universo de participación”. (Wheeler, A., & Mehra, 1973, p. 244. En: Capra, 2012)

indistinguibles”. Para el autor esto es un vínculo indudable entre la cosmovisión que subyace en la física cuántica y estas religiones, y para enfatizar en ello, presenta al lector ideas o teorías en torno a estas creencias:

El budista no cree en un mundo externo que exista independiente y separadamente, y en cuyas fuerzas dinámicas pueda él insertarse. Para él el mundo externo y su mundo interior son sólo dos lados de la misma tela, en la que los hilos de todas las fuerzas y de todos los sucesos, de todas las formas de conciencia y de sus objetos, están entretnejidos formando una red inseparable de relaciones sin fin, mutuamente condicionadas. (Capra, 2012, p. 195)

Podríamos continuar con la exposición de otras “analogías” que nos presenta Capra, pero solamente nos interesa mostrar la forma de proceder del autor en su texto, dado que el esquema que se sigue a lo largo de todo el libro es similar a lo que hemos mostrado hasta aquí. Lo que hemos expuesto sólo es una pequeña muestra de las múltiples relaciones que Capra desarrolla en su texto.

Con esto podemos advertir que Capra solamente hace una recopilación de citas que supuestamente muestran analogías y con ellas llega a conclusiones distantes a lo que se establece en la física cuántica. En este sentido, esta situación podría considerarse un tanto engañosa puesto que adapta la serie de citas, de tal manera que muestren la aparente relación que él concluye, además de que no advierte al lector los alcances de la propia teoría.

Siguiendo a Restivo (1978), sociólogo de la ciencia, quien fue uno de los que criticaron el texto pocos años después de su publicación, menciona que el hecho de haber traducido las ecuaciones matemáticas propias de la teoría y los aforismos de las doctrinas elegidas, escritos en principio en sánscrito, a un solo lenguaje para que fuera posible la comparación, es ingenuo y además implica una farsa pues se comparan declaraciones escritas en distintas épocas, por lo que no se puede asumir que la comparación entre las traducciones hechas sea razonable. Además de esto, podemos agregar que en todo proceso de traducción se implica un cierto grado de distorsión para el significado original, tal circunstancia implica considerar el significado que el autor propone, así como el significado que el propio lector adopta, aumentando así la posibilidad de que las conclusiones a las que se lleguen sean inexactas.

Otra crítica que recibió *El Tao de la Física* fue que muchos de los ejemplos que Capra seleccionó no podrían haber sido aceptados por la interpretación ortodoxa, a pesar de que el físico austriaco hace una advertencia al lector de que la exposición se basa en dicha

interpretación. Referir a la idea de que los ejemplos no pudieran ser aceptados por la interpretación de Copenhague se debe a que muchas de las citas que recoge Capra se refieren a señalamientos sobre la idea de complementariedad de Bohr y a interpretaciones personales de los físicos citados, ideas que no necesariamente fueron apoyadas o respaldadas por toda la comunidad de físicos. Para los críticos, los ejemplos que Capra desarrolla presentan una mezcla de interpretaciones contradictorias, produciendo un “vaivén esquizofrénico” (Restivo, 1978). En este sentido, cabe advertir que para detectar estas discrepancias en el texto de Capra se necesitaría del conocimiento anticipado de la teoría, circunstancia que difícilmente se cumpliría con los lectores legos, lo que dificultaría o imposibilitaría la capacidad de visualizar las discordancias en el texto y habría gran posibilidad de que los argumentos sean aceptados de manera ingenua.

Frente a lo expuesto en esta sección, tenemos que tener presente que las citas que Capra recoge corresponden, efectivamente, a expresiones que fueron manifestadas en varias de las publicaciones hechas por los físicos fundadores de la teoría, como lo hizo Bohr, Heisenberg, Bohm, entre otros. Dichas declaraciones reflejan, en cierto sentido, las conclusiones un tanto débiles del razonamiento de estos personajes frente a la falta de claridad en la interpretación de la teoría al momento de intentar elucidar el postulado del colapso y el concepto de complementariedad de Bohr. No obstante, en el tipo de afirmaciones que vimos anteriormente no es posible distinguir de manera clara aquello que pertenece a la teoría y aquello que proviene de apreciaciones personales.

En este mismo sentido, cabe destacar la aportación hecha por el físico húngaro Eugene Wigner (1902-1995) en un artículo titulado “Remarks on the Mind-Body Question” publicado en 1962, el cual se ha considerado como una fuente que ha abierto la puerta a los argumentos que afirman la participación de la conciencia en las mediciones cuánticas. Observemos brevemente la propuesta de Wigner con la que buscaba demostrar que el colapso de la función de onda se efectúa cuando hay una participación de la conciencia.

El experimento mental que Wigner utilizó para argumentar esto se conoce como “el amigo de Wigner”, se trata de una variante del experimento mental de Schrödinger sobre el gato vivo o muerto¹⁰². Este experimento ya lo hemos abordado brevemente en otra sección de la tesis, pero aquí lo retomaremos para recordar el argumento implícito en él y mostrar cómo éste ha sido recogido para justificar ideas pseudocientíficas.

¹⁰² Cfr. Sección “Paradoja del gato de Schrödinger” en 2.3: Representación del papel del observador y los instrumentos de medición a través de textos divulgativos.

Wigner supone un sistema microfísico que puede encontrarse en dos estados, a_1 o a_2 . Para medir a este sistema, consideremos un dispositivo que señalará a partir del encendido de una lámpara si el sistema está en a_1 o a_2 . Digamos que, si se detecta a_1 , la lámpara se encenderá y si detecta a_2 permanecerá apagada. En este punto, Wigner introduce otro elemento, que se tratará de un amigo que será el que observe la lámpara y le comunique a Wigner qué fue lo que observó, es decir, le informará sobre cuál fue el resultado. Estos elementos serán contenidos en una función de onda que representará el sistema total, incluyendo al amigo. De acuerdo con Wigner, cuando se le pregunte al amigo qué fue lo que vio y éste responda si la lámpara está encendida o apagada, la función de onda pasará de estar en varios posibles estados a uno solo.

En este experimento mental tenemos que el observador final será quien pregunte al amigo cuál fue su observación. Ahora supongamos que el amigo de Wigner responde que vio la lámpara encendida, y Wigner le vuelve a preguntar: ¿habías visto la lámpara encendida antes de preguntártelo?, el amigo responderá que sí. Con esta respuesta, nos dice, se estaría contradiciendo a la interpretación ortodoxa, pues la función de onda estaría tomando un valor definido antes de que Wigner, o el último observador, obtuviera la respuesta de su amigo. Frente a lo anterior, Wigner concluye que la participación de la conciencia es necesaria para determinar el colapso de la función¹⁰³.

La propuesta de Wigner toma importancia por ser una de las fuentes más referidas por aquellos que buscan difundir la relación entre la conciencia y lo que se postula desde la interpretación ortodoxa de la mecánica cuántica. De esta manera, la postura de Wigner, así como las apreciaciones que tuvieron los físicos fundadores de la teoría, representan un acceso para inferir interpretaciones que sobrepasen el poder explicativo de la teoría misma, pues se llega a relacionar con aspectos religiosos, como lo vimos con Capra o con aspectos de la conciencia con Wigner, o con medicina alternativa como lo hace Deepak Chopra, promotor de la “curación cuántica”.

Sobre esto último es importante señalar que hoy en día podemos encontrar innumerables alusiones al término de “cuántica” en servicios que promocionan terapias o tratamientos para sanar malestares de salud. Este tipo de prácticas adaptan ciertas ideas o conceptos de la teoría con la finalidad de “validar” lo que promocionan, aprovechándose y

¹⁰³ El artículo de Wigner puede consultarse en: Wigner, E. (1962) “Remarks on the Mind-Body Question”. En *The Scientist Speculates*, I.J. Good (ed.), London: William Heinemann. Y para revisar esta paradoja, así como la del gato de Schrödinger, ambas resultado de la interpretación ortodoxa, se puede consultar: De la Peña, L., & Cetto, A.M., (1973) “De Gatos cuánticos y amigos metacuánticos”, en: *Revista Mexicana de Física - E*, (22), pp. 43-55.

engañando a las personas que confían en los servicios que se les ofrecen. Como hemos mencionado párrafos atrás, el alcance explicativo de la mecánica cuántica solamente comprende los fenómenos en el mundo de las partículas y las ideas que dicen mostrar una relación de la teoría con aspectos místicos, religiosos y en este caso, con la salud no cuentan con sustento teórico ni verificación experimental.

Lo anterior refleja una de las dificultades a las que se enfrenta la actividad de divulgación, y en concreto la divulgación de la física cuántica, dado que uno de los objetivos del trabajo de divulgación es hacer frente a la charlatanería.

No solamente las personas que están alejadas del área de la ciencia son las más propensas a aceptar, sin hacer crítica alguna, lo establecido en el discurso divulgativo, sino que en los sectores académicos también se observa el defecto de la credulidad que no pasa por algún tamiz de crítica.

En la siguiente sección se expondrá rápidamente cómo dentro de la academia también se ha incurrido en el uso de términos propios de la física cuántica para justificar o avalar algunas ideas relacionadas con las ciencias sociales y humanidades.

3.3 Transgresión de fronteras

Como hemos visto a lo largo de la tesis, la comunicación científica es una de las actividades propias de la ciencia, en el sentido de que en ella se producen textos destinados tanto a los colaboradores o colegas, como a grupos que no pertenecen al núcleo de trabajo (Mellor, 2003; Shinn & Whitley, 1985). Hemos señalado también que de la comunicación científica se deriva la divulgación de la ciencia, la diferencia esencial entre ambas actividades reside en el tipo de público al que está destinada la información; se habla de divulgación cuando los públicos son grupos distintos al de los especialistas, es decir, podrían ser especialistas, pero de otras áreas, o bien, un público más general. La comunicación engloba actividades de divulgación y difusión¹⁰⁴.

¹⁰⁴ Cfr. PREÁMBULO. En esa sección se describen de manera más amplia los conceptos pertenecientes a la *Comunicación de la ciencia* como disciplina.

En esta sección se presentará cómo desde grupos académicos se han retomado ciertos conceptos procedentes de la física cuántica para justificar algunos argumentos en los que se extrapola el sentido original de dichos conceptos. Para ello, nos situaremos en el *caso Sokal*.

El caso Sokal surge de un artículo titulado: “Transgredir las fronteras: hacia una hermenéutica transformadora de la gravedad cuántica”, que fue publicado por la revista cultural *Social Text* en 1996. Éste fue escrito de manera premeditada por el físico estadounidense Alan D. Sokal (1955 -) con la intención de mostrar la mala calidad de los procesos de evaluación dentro de la academia de Estados Unidos en las áreas de humanidades y ciencias sociales y, en este sentido, evidenciar que las líneas de investigación posmodernas en humanidades no cumplían con buen grado de rigor¹⁰⁵. En ese artículo se hace un uso indiscriminado de términos provenientes de la física cuántica, así como de citas provenientes de los físicos fundadores de la teoría cuántica, las cuales el autor las vincula con otras citas procedentes de filósofos franceses contemporáneos (Beller, 1998; Sokal, A. & Bricmont, 2008).

En dicho artículo, Sokal aparentemente aprueba la relación entre misticismo y la física cuántica, pero lo que en realidad hace es una crítica velada a dicho vínculo, a los trabajos posmodernos y, como hemos mencionado, a los procesos de evaluación en la academia.

El interés por detenernos en este caso, reitero, es para mostrar que dentro de la comunicación científica que se da en la academia también se pueden presentar casos en los que se estén propagando ideas tergiversadas de conceptos propios de la física cuántica y así, también se estaría promoviendo una divulgación equivocada de la ciencia, que, de manera similar a la divulgación hecha por Capra, provoca interpretaciones en las que se mezclan distintos tipos de conocimientos y creencias que en apariencia se respaldan por lo establecido en la física cuántica.

La idea general que Sokal presentó en el artículo es que “la ciencia posmoderna se ha liberado de la verdad objetiva” y a partir de ello se busca politizar a la ciencia con la idea de que ésta debería ser juzgada “no por su correspondencia con la realidad, sino por su compatibilidad con prejuicios ideológicos individuales”. Tal idea la busca sustentar con ideas aisladas de la física cuántica. A simple vista, este argumento podrá resultar algo

¹⁰⁵ Para Alan Sokal como para Jean Bricmont, esa nueva corriente se caracterizaba “por el rechazo de la tradición racional de la Ilustración, por elaboraciones teóricas desconectadas de cualquier prueba empírica, y por un relativismo cognitivo y cultural que considera que la ciencia no es nada más que una «narración», un «mito» o una construcción social”. (Sokal, A. & Bricmont, 2008, p. 19)

confuso y complicado, y dicha particularidad será percibida a lo largo del artículo, pues en él se presenta una serie de deducciones derivadas de un conjunto de citas adaptadas que no logran mostrar claridad entre ellas.

Poco después de que el artículo fuera publicado por Social Text, Sokal reveló en otro artículo, en la revista *Lingua Franca*, que la publicación en Social Text se trataba de un engaño, y así, desató un gran escándalo en el mundo académico que llegó a conocerse en otros medios más públicos. Lo que Sokal buscaba mostrar era que:

[...] el empleo abusivo de diversos conceptos y términos científicos, utilizando ideas científicas sacadas de contexto, sin justificar ese procedimiento [...] extrapolaciones no basadas en argumento alguno, se lanzaban al rostro de sus lectores no científicos montones de términos propios de la jerga científica, sin preocuparse para nada de si resultan pertinentes, ni siquiera de si tienen sentido. (Sokal, A. & Bricmont, 2008, p. 14).

Para él, este tipo de argumentación caracterizaba a los nuevos estudios posmodernos de las humanidades y ciencias sociales, que en aquel momento se encontraban en boga.

En la primera parte del artículo publicado en Social Text, Sokal concluye que “la realidad física es en el fondo una construcción lingüística y social”, afirmando en algún punto que la mecánica cuántica está constituida por un “tejido cultural”. Para apoyar dicha aseveración alude a afirmaciones hechas por Stanley Aronowitz, quien en aquel momento era uno de los editores de Social Text. Sokal hace referencia al entrelazamiento cuántico y alude a él como el fenómeno de “acción fantasmal a distancia” aludiendo a una afirmación hecha por Einstein. Sokal habla del entrelazamiento a continuación:

Este fenómeno impone una reevaluación radical de los conceptos mecanicistas tradicionales de espacio, objeto y causalidad, y sugiere una visión del mundo alternativa, en la que el universo se caracteriza por la interconexión y el conjuntismo/holismo, es decir, lo que el físico David Bohm ha denominado «el orden implicado». (Sokal, 1996)

Después de la anterior cita muestra la siguiente referencia a Aronowitz, en la que supuestamente se presenta una relación entre la causalidad no lineal de la mecánica cuántica y la construcción social del tiempo:

La causalidad lineal supone que la relación entre causa y efecto puede expresarse como función de la sucesión temporal. Gracias a los recientes avances en mecánica cuántica, podemos postular que es posible conocer los efectos de las causas ausentes; es decir, metafóricamente hablando, que los efectos pueden anticiparse a las causas, hasta el punto de que nuestra percepción de ellos puede preceder al momento en el que se produce físicamente la «causa». La hipótesis, que desafía nuestra concepción convencional del tiempo lineal y de la causalidad, y que afirma la posibilidad de una inversión del tiempo, también plantea la cuestión del grado

en que el concepto de «flecha de tiempo» es inherente a toda teoría científica. Si estas experiencias tienen éxito, se podrán poner en tela de juicio las conclusiones relativas al modo en el que el tiempo, como «tiempo de reloj», se constituyó históricamente. Se habrá demostrado experimentalmente lo que los filósofos y los críticos literarios y sociales han presentado desde hace mucho tiempo: que el tiempo es, en parte, una construcción convencional, y que su segmentación en horas y minutos es un producto de la necesidad de disciplina industrial, para poder llevar a cabo una organización racional del trabajo social a comienzos de la era burguesa. (Aronowitz, 1988. En: Sokal, 1996)

Por último, Sokal menciona que la idea general que está implícita en las interpretaciones del New Age es “correcta”; en ese punto, a manera de nota de pie de página, recomienda el texto de Capra como una fuente de consulta. Con ello, se advierte que Sokal retoma la relación entre física cuántica y misticismo de Capra, y lo transmite en otro medio de difusión de la ciencia, dentro de una revista académica dirigida a la comunidad de sociólogos y humanistas.

Aquí podríamos hacer la misma observación hecha al texto de Capra, con la diferencia que Sokal lo hizo deliberadamente para después evidenciar el defecto; ambos autores, Capra y Sokal, difundieron un significado tergiversado de algunos razonamientos propios de la física cuántica. Como se ha mencionado, las citas que ambos autores recogen pertenecen, en efecto, a los físicos fundadores de la teoría; sin embargo, se pierde el contexto en el que las aseveraciones fueron manifestadas. Nos detendremos un poco en ello.

En el momento en el que se estableció el formalismo de la teoría los físicos buscaron otorgarle un significado a ese formalismo, es decir, dar una interpretación de la teoría. Con ello, Bohr propuso la idea de complementariedad, la cual ha sido causa de varias críticas por las descripciones un tanto oscuras que él manifestó. A pesar de ello, sus compañeros, Heisenberg, Pauli, Born y Jordan, retomaron ciertas ideas relacionadas con ese concepto y manifestaron declaraciones que buscaban dar un significado a la teoría, o bien, que de manera intencional relacionaban a la física cuántica con otros ámbitos. Veremos que estas declaraciones han permitido que se les considere como una fuente para respaldar argumentos que sobrepasan el poder explicativo de la física cuántica.

Dentro de los estudios relacionados con la historia de la física cuántica es frecuente encontrar señalamientos sobre la escritura de Bohr, a quien se le caracteriza por tener una escritura ambigua, en específico cuando trata su propuesta de complementariedad. Hay quienes se han dedicado a estudiarlo y tratar de interpretar sus textos, y hay quienes lo desaprueban por lo confuso que resultan sus argumentos.

Un ejemplo de una declaración de Bohr que se puede retomar para colocarla en otros espacios y así crear un supuesto vínculo entre física cuántica y otro sector de conocimiento puede ser el siguiente:

[...] la manera en la cual la vida psíquica, impregnada del sentimiento de voluntad, está sin remedio influida por la introspección, presenta una semejanza sorprendente con las circunstancias que nos obligan a renunciar a la causalidad en el análisis de los fenómenos atómicos. En particular, y según se indica allí, se podría perfeccionar por completo nuestra interpretación del paralelismo psico-físico, que en su origen se apoyó en la descripción causal de la física, teniendo en cuenta la modificación imprevisible que se provocaría en la vida psíquica a partir del momento en el que se intentasen seguir con objetividad de los procesos físicos que tienen lugar a la vez en el sistema nervioso central. A este respecto no debemos olvidar, sin embargo, que la asociación de los aspectos psíquicos y físicos de la existencia presenta una relación particular de complementariedad que no puede expresarse íntegramente de una manera intuitiva por medio de leyes sólo físicas o sólo psicológicas. (Bohr, 1988, p. 70)

En la anterior cita es evidente el vínculo que Bohr hace con la idea de complementariedad y con aspectos psíquicos. Este tipo de argumentos pasarían a ser referencia de otros autores para justificar conclusiones que quedan fuera de la física cuántica.

En el mismo sentido, Born llegó a vincular física y política: mencionó que “las lecciones epistemológicas [de la física] pueden ayudar a una comprensión profunda de las relaciones sociales y políticas” (Born, 1956. En: Beller, 1998).

Por su parte, Heisenberg menciona en *Física y filosofía* (1963) que “el mundo se nos aparece, así como un complicado tejido de acontecimientos en los que las relaciones de diferente clase alternan, o se superponen, o se combinan y determinan así la textura del todo”. Este fragmento lo recoge Capra para hablar de una “telaraña cósmica interrelacionada” la cual la vincula con ideas del budismo e hinduismo. De la misma manera, Jordan, Pauli y Bohm, hicieron sus propias declaraciones que también podrían tomar diversos significados.

Con lo anterior podemos ver, tal como lo mencionó la historiadora de la ciencia Mara Beller (1998), que cuando autores como Stanley Aronowitz hacen paralelismos entre la física cuántica y la política, o el psicoanálisis, o cuestiones relativas al área de ciencias sociales, están “pisando un camino bien legitimado por la autoridad científica de los grandes físicos cuánticos, en cuyos escritos encontramos las raíces de los excesos posmodernos de hoy”.

Regresemos al artículo de Sokal. En la segunda sección de éste, el autor se dedica a presentar los conceptos de discontinuidad e indeterminismo desde un discurso

posmoderno, mezclando citas de los textos personales de Heisenberg, Bohr, Born, y de intelectuales posmodernos. Cabe reiterar que las citas que se presentan de estos físicos sí son razonamientos que en algún momento expresaron; sin embargo, la forma en que ellos hacían dichas declaraciones, es decir, el lenguaje utilizado, se ha señalado como una causa que ha permitido justificar algunas interpretaciones místicas. (Beller, 1996, 1998)

En lo que resta del artículo publicado en Social Text se sigue un estilo similar; por cada afirmación realizada se ha de remitir a varios autores para aparentar, de cierta manera, que se fundamenta lo declarado. Teniendo esto en cuenta, se puede observar que la estructura que subyace en la forma de presentar el contenido en este artículo es similar a la que Capra utilizó en su libro, es decir: el discurso está acompañado de citas recogidas de los físicos fundadores de la teoría para “sustentar” los argumentos, así mismo recoge ciertas citas de los representantes del movimiento posmoderno en humanidades como Deleuze, Lacan, Derrida, entre otros, quienes llegaron a incorporar ideas de la física moderna para construir sus propios argumentos.

Después de la publicación en Social Text, Alan Sokal y Jean Bricmont escriben *Imposturas intelectuales* (2008); en este texto los autores amplían sus reflexiones con respecto al experimento en Social Text, e indican que en ningún momento se pretendió atacar a la filosofía, las humanidades o ciencias sociales en general, puesto que las valoran como disciplinas de gran importancia; sino que lo que se persiguió fue “poner en guardia a quienes trabajan en estos temas y, muy especialmente, a los estudiantes frente a algunos casos manifiestos de charlatanería”. (Sokal, A. & Bricmont, 2008, p. 23)

Es importante señalar que la publicación de Sokal fue todo un suceso que recibió muchas críticas y análisis por parte de los estudios sociales sobre la ciencia. No obstante, aquí no se pretende profundizar en los problemas que surgieron a raíz de la publicación de Sokal, pues estaríamos desviándonos de nuestros propósitos de esta sección: mostrar el intercambio de concepciones provenientes de la física cuántica con estudios concernientes a las ciencias sociales y humanidades.

Como vimos párrafos atrás, las citas que han sido retomadas en los textos que abordamos, como el de Capra, Sokal y éste a su vez, el de Aronowitz, realmente fueron expresadas por los físicos fundadores de la física cuántica, quienes promocionaban la idea de complementariedad y se comprometían con la interpretación de Copenhague. Sabemos que el artículo de Sokal fue escrito deliberadamente para denunciar y advertir de aquellos otros textos en donde, de manera intencional, se hace uso de concepciones que surgen de

cierta área de conocimiento y de pronto, son utilizadas para incorporarlas a otros campos de estudios. Por otro lado, tenemos las publicaciones de Capra y Aronowitz en donde las referencias son utilizadas con credulidad o confianza, por decirlo de alguna manera, para apoyar otro tipo de ideas.

Con estos datos cabe la posibilidad de preguntarnos cómo se podría evitar esto. Beller (1998) nos da luz sobre esta cuestión; nos dice que los “físicos de nuestro tiempo tendrían que declarar públicamente que la ortodoxia de Copenhague no es obligatoria o un imperativo”, y a ello le agregaría que se tendría que visibilizar la idea de que la interpretación de Copenhague no se puede aceptar de manera ingenua, sino que en ella residen discusiones a las que no se ha llegado a soluciones definitivas, además de mostrar las propuestas de otras interpretaciones. En este sentido, la divulgación de la física cuántica tendría un espacio para su quehacer.

Como se mencionó anteriormente, la razón de haber señalado el caso Sokal y el caso de Capra fue mostrar una de las preocupaciones para la divulgación de la ciencia y para la ciencia misma, la cual es determinar los límites entre lo que es ciencia y lo que se hace pasar por ciencia.

Es importante señalar que lo que se presenta aquí está relacionado con la física cuántica debido al tema de investigación que se ha desarrollado; sin embargo, este tipo de sucesos también podrían aparecer en productos de divulgación sobre alguna otra ciencia. En este sentido, cabe advertir a quienes se dedican a la divulgación que la responsabilidad de esta actividad también radica en la verificación y confrontación de fuentes, para evitar difundir información errónea. Por otro lado, también sería valioso que en cualquier trabajo de divulgación cuyo tema pueda resultar polémico, en el sentido de que pueda generar interpretaciones confusas en el público, se le advierta al público sobre ello y así, ofrecer una divulgación documentada y responsable.

En la siguiente sección abordaremos cómo esta problemática se ha reflexionado desde la filosofía de la ciencia.

3.4 ¿Divulgación pseudocientífica?

Antes de abordar el problema de la pseudociencia en la divulgación de la física cuántica se dará una breve recapitulación de cómo se ha abordado esta problemática dentro de la filosofía de la ciencia, con el objetivo de mostrar lo complejo que resulta marcar una línea divisoria entre la ciencia y aquello que no lo es, pero aparenta serlo. Más adelante observaremos que dicha dificultad se traslada a la divulgación de la ciencia.

El problema de la demarcación de la ciencia se ha discutido ampliamente en la filosofía de la ciencia; cuando nos referimos a la demarcación, se está hablando de la búsqueda de algunos indicadores que nos permitan distinguir a la ciencia de la no ciencia. El interés por delimitar qué es la ciencia puede responder a razones teóricas como prácticas; en el primer sentido porque es una perspectiva esclarecedora que contribuye a la filosofía de la ciencia, y en el sentido práctico porque tener en claro esa distinción influirá en orientar decisiones tanto en la vida privada como práctica (Hansson, 2015; Mahner, 2007).

En la actualidad, la ciencia representa un estatus en la sociedad (Hansson, 2015) y esto se puede observar en los intentos de exagerar el estado científico de propagandas, enseñanzas y productos; por ejemplo, la expresión “comprobado científicamente” se dice para otorgarle cierto valor y reconocimiento a lo que se esté refiriendo. Al considerar este ejemplo, podría surgir la siguiente pregunta: ¿cómo saber si efectivamente se habla de algo que corresponde a la ciencia?

En primera instancia, mencionaremos a qué nos referimos con pseudociencia y para ello retomaremos la explicación de Hansson (2017). El autor asegura que una actividad o enseñanza pseudocientífica debe satisfacer los siguientes criterios: a) no es científico, y b) sus principales proponentes intentan crear la impresión de que es científico. A esto se puede agregar que es aquello que supuestamente se basa en el método científico o tiene el estatus de ser científico. Si consideramos esto, es casi evidente que se asoma la pregunta ¿qué es ciencia y qué es científico?

Uno de los filósofos que dedicó gran parte de sus investigaciones en exponer e intentar dar solución al problema de la demarcación fue Karl Popper (1902-1994). Para él, a través del criterio de falsabilidad se podría discernir entre lo que es ciencia y lo que se hace pasar por ciencia. Señaló que una teoría falsable es aquella que contiene al menos un

enunciado básico que sea objeto de refutación, en otros términos, que la teoría contenga enunciados que sean capaces de estar en conflicto con posibles observaciones futuras, o bien, que la teoría haga predicciones arriesgadas que posteriormente sean objeto de confirmación (Popper, 1957). En este sentido, las teorías que cumplieran dicho criterio podrían considerarse científicas. Popper (1962) presentó esta propuesta como una manera de trazar la línea entre las declaraciones que pertenecen a las ciencias y aquellas afirmaciones de carácter religioso o metafísicos, o pseudocientíficas.

Por ejemplo, una de las críticas que Restivo (1978) le hizo al texto de Capra estuvo influenciada por la postura popperiana de falsabilidad. Él señaló que algunas de las referencias que Capra proporcionó sobre la teoría cuántica bien podrían pasar por el “tratamiento empírico”, ser replicadas y comparadas para así verificar su validez, mientras que las afirmaciones místicas, que supuestamente concuerdan con lo establecido por la teoría, simplemente se tratan de intuiciones individuales de los místicos, situación que difícilmente podría replicarse y pasar por el criterio de falsabilidad.

En un principio, el problema de demarcación y la posible solución a partir de la propuesta de Popper parecía aceptable, pero pronto salieron a la luz varias críticas. Una de ellas fue por parte de Thomas Kuhn (1922-1996), quien señalaba al criterio de Popper como una solución simple, pues indicaba que Popper sólo se enfocó en eventos “revolucionarios de la ciencia”, los cuales solamente se presentan ocasionalmente. Es decir, para Kuhn el falsacionismo de Popper solamente consideraba “los casos bastante raros en los que se pone en juego toda la teoría”. En este sentido, Kuhn propuso que la demarcación se debería obtener de la capacidad de la ciencia de resolver problemas o anomalías, situación que se enmarca en la etapa que él llamó *ciencia normal*, y no en la etapa de *ciencia revolucionaria*, en la que las resoluciones contemplan otros problemas. (Hansson, 2017)¹⁰⁶

Para Kuhn, sería en la etapa de la *ciencia normal* donde podríamos distinguir características de la ciencia que la diferencian de otros proyectos, es decir, de posturas no científicas. A pesar de que el criterio de demarcación de Kuhn difería del de Popper, coincidía en que los límites entre ciencia y pseudociencia no era una problemática fácil de resolver.

¹⁰⁶ Hay que destacar que la propuesta de Kuhn también fue objeto de crítica. Una de ellas es que en *La estructura de las revoluciones científicas* (1962) no logra determinar con claridad a qué se refiere con su concepto de “paradigma”, situación que él mismo aceptó y más tarde trató de dejarlo en claro en su artículo “The Second Thoughts of Paradigms” (1977).

Otras críticas a Popper las hicieron el físico Pierre Duhem y el filósofo W.V.O. Quine. Cada uno de ellos realizó su propio análisis, pero debido a que las ideas se asemejan, al conjunto de ambas propuestas se le ha conocido como la “Tesis Duhem-Quine”. La tesis, en resumen, propone que el criterio de falsabilidad no puede ser aplicado a un solo enunciado o hipótesis de una teoría, pues en caso de que dicho enunciado sea falsable, siempre se podrá acusar del fallo a una hipótesis auxiliar, por lo que será posible modificar o eliminar tal hipótesis, pero no rechazar a la teoría completa. Los autores reconocieron que la ciencia no puede considerarse como una actividad unificada: se trata de una actividad que siempre está en continuo cambio, situación que permite que se conecte con esfuerzos no científicos.

Varios interesados en el tema trataron de reformular la problemática y buscaron determinar qué se entendería como pseudociencia. Uno de ellos fue el filósofo Norwood Russell Hanson (1961), quien señaló que una afirmación pseudocientífica se puede comprender como aquella en la que sus defensores principales traten de crear la impresión de que es científico, refiriéndose a un problema que está dentro de los dominios de la ciencia pero que no es justificable epistemológicamente. Por su parte, el físico Alan Sokal (2008)¹⁰⁷, indicó que el rasgo principal de la pseudociencia es que hace declaraciones y establece relaciones causales consideradas inverosímiles por la ciencia convencional.

Por otra parte, hay quienes han considerado el problema de la demarcación como un problema sin importancia y en desuso. Larry Laudan (1941 -) fue uno de los que consideró este problema como superfluo. En su texto *La desaparición del problema de demarcación* (1983), no dejaba alguna posibilidad de encontrar un criterio necesario y suficiente de algo tan heterogéneo como la metodología científica. Indicó que el concepto de pseudociencia es pernicioso e inútil, por lo que dedicarse a este tema sería una pérdida de tiempo ante un proyecto ya fracasado.

Durante algún tiempo el problema de la demarcación se frenó en la filosofía de la ciencia, lo cual se reflejó en la escasez de publicaciones académicas en torno al tema. Probablemente la principal razón de esta falta de interés es que la demarcación ha demostrado ser bastante complicada. Prácticamente todos los criterios de demarcación propuestos por los filósofos de la ciencia han resultado ser demasiado estrechos o demasiado amplios. Por lo tanto, la mayoría de los filósofos de la ciencia contemporáneos

¹⁰⁷ Sokal aborda el problema de la pseudociencia a partir de la crítica que realiza a los discursos oscuros del posmodernismo, mencionando que en ellos hace falta la honradez intelectual, pues en ellas se favorece el antiintelectualismo que se extiende entre el público. Ver: 3.3 “Transgresión de fronteras”

creen que simplemente no hay ningún conjunto de criterios de demarcación individualmente necesarios y conjuntamente suficientes (Pigliucci, M. & M. Boudry, 2013).

No obstante, en años más recientes el interés ha resurgido, al no ver la pertinencia de acoger una postura de desinterés tan contundente. Dado que si se acepta que no es posible evaluar o refinar esos criterios y se opta por renunciar a tal problemática, implícitamente se estaría renunciando a una de las tareas más fundamentales de la filosofía relacionada con la pregunta “¿Qué es el conocimiento?” (Ibíd., 2013). Se ha considerado que la preocupación por la demarcación deberá tomar en cuenta otros factores vinculados a las circunstancias sociales, lo que permitirá reflexionar sobre la diferenciación entre ciencia y pseudociencia desde la filosofía y la historia de la ciencia; el análisis desde estas disciplinas establecerá las condiciones que nos permitirán trasladarnos a una reflexión desde la comunicación y divulgación de la ciencia, materia que interesa en el presente trabajo.

Para reflexionar sobre pseudociencia desde un enfoque más amplio tenemos que tener en cuenta lo que hemos mencionado al inicio de esta sección: hoy en día la ciencia está teniendo un impacto cada vez mayor en la sociedad moderna, demandando a su vez prestigio y la atención del público, pues su financiación depende del gobierno y del sector privado. Ante estas circunstancias, Massimo Pigliucci y Maarten Boudry (2013) argumentan sobre la importancia de comprender la naturaleza de la ciencia, sus fundamentos epistémicos, sus límites e incluso su estructura de poder. También indican que no se podrá tomar una postura similar a la establecida en los primeros debates referentes a la demarcación, como lo señalaba Popper, debido a que son posiciones muy restrictivas o muy libres; sino que se tendría que tomar una postura un tanto pragmática, que permita observar las consecuencias evidentes que están en estrecha relación con la sociedad, o en términos de comunicación científica, con el público. Para ello es necesario disponer del estudio interdisciplinar entre filosofía e historia de la ciencia, y también desde la comunicación de la ciencia.

La pseudociencia en la divulgación de la ciencia es una situación que se hace visible. Es un asunto controvertido y complejo que puede llegar a suponer un riesgo para la sociedad (Cortiñas-Rovira et al., 2015). La pseudociencia puede causar tantos problemas de entendimiento o comprensión, en parte, porque es difícil que el público aprecie la diferencia entre la ciencia real y algo que se hace pasar por ciencia; esta situación se traduce desde suponer que un producto es mejor que otro, simplemente por estar “comprobado

científicamente”, hasta aceptar y optar por terapias medicinales que dicen estar avaladas científicamente y que representan un riesgo para la salud.

Hoy en día podría parecer que para muchos involucrados con la ciencia, ya sea estudiantes o investigadores, podría ser sencillo distinguir entre la ciencia y la pseudociencia, idea que sostenían los primeros filósofos de la ciencia que trataron con el problema de demarcación; sin embargo, no es razonable pensar que todos los involucrados en las ciencias puedan hacer tal distinción. Esta problemática se puede trasladar a los propios científicos, debido al fenómeno de especialización que se observa en todas las ciencias, pues al dedicarse a algo específico se podría perder el entendimiento con respecto a otras áreas. Por otro lado, si trasladamos la problemática a las personas que no poseen un conocimiento científico advertimos que ellas son más propensas a aceptar las ideas derivadas de la pseudociencia.

Considerar lo anterior y enfocarlo en la física cuántica hace que surjan las siguientes cuestiones: ¿Cómo el divulgador y el público lego podrá distinguir aquello que realmente pertenece a la teoría cuántica, en otras palabras, hacer el ejercicio de delimitación?; y ¿cómo el divulgador de la ciencia puede prevenir al interesado? Con esto podemos advertir que la problemática de la pseudociencia también se hace presente en la divulgación, y es considerada una dificultad a la que hay que enfrentarse, teniendo como objetivo: evitar o eliminar los engaños presentados. (Sánchez Mora, 2010)

A lo largo de este capítulo hemos visto que esta problemática se hace evidente en algunos trabajos que han sido catalogados como divulgación de la física cuántica, pues en ellos se vinculan ideas místicas con concepciones propias de la teoría. Frente a este tipo de publicaciones es conveniente cuestionar: ¿cómo determinar la frontera entre el conocimiento genuino y el que no lo es?, ¿cómo presentar tal conocimiento a un público y qué es lo que se le va a presentar? Aunado a estas interrogantes dirigidas a establecer los límites de lo que es ciencia, está también el problema de identificar a los expertos. (Hilgartner, 1990)

Sólo por mencionar un ejemplo de los razonamientos que se han propagado de manera errada a partir de una argumentación falaz basada en ciertas concepciones de la teoría cuántica, se tiene el siguiente argumento: hay quienes comienzan afirmando que “las partículas subatómicas no adquieren alguna de sus características hasta que sean medidas u observadas, en otras palabras, las partículas subatómicas no parecen existir en una forma definitiva hasta hacer la medición o bien, sean observadas”; de esta premisa se trasladan a

una declaración derivada de una malinterpretación: “los objetos a nuestra escala al estar conformados por partículas también deben ser observados para poder existir”. Otra manera de decir esta conclusión es: “la realidad última está en la mente del observador”.

Esta afirmación hace referencia al papel que juega la observación y a la controversia que surge de la interpretación más difundida de teoría cuántica, la interpretación de Copenhague, pero que se trata de una extrapolación de un criterio que no se aplica en el nivel de los objetos a nuestra escala. Es decir, estas ideas simplemente no se pueden derivar de la teoría cuántica, pues en ella el papel de la conciencia humana y de los procesos mentales no están presentes. (Wynn, 2001)

El comunicar la física cuántica tiene implícitas, de alguna manera, las mismas problemáticas epistemológicas que ella tuvo en su construcción: ¿cómo se debería entender la teoría, considerando que ella implica despegarse del sentido común?

Para el físico Dennis Dieks (1996), el fenómeno de la divulgación de la cuántica y su relación con ideas místicas podría derivarse en parte de las controversias que se presentan en los fundamentos de la teoría, relacionadas con la falta de una interpretación que esté aceptada de manera unánime y pueda proporcionar una imagen clara del comportamiento subatómico. Advierte que la peculiar situación de la interpretación es que no existe una única visión del mundo que sea aceptada de manera general. Sólo existe la sensación general, entre los físicos, de que cualquier interpretación sería no debería estar distante de las nociones del sentido común. Por lo que no es de extrañarse que, ante esas circunstancias, muchos divulgadores sean atraídos por las propuestas extravagantes y, por ende, encontrar que predominen las publicaciones en donde se vincula a la física cuántica con la conciencia humana o con el misticismo oriental. Frente a esta situación, Dieks indica que es casi una obligación moral para la comunidad de la física prestar más atención a la “pragmática” de la ciencia, buscando desarrollar ideas claras y distintas acerca de la mecánica cuántica.

Como hemos visto a lo largo de este capítulo, desde la filosofía de la ciencia y la epistemología ha surgido la preocupación por desarrollar criterios de demarcación, pero hasta la actualidad no se ha llegado a un acuerdo; no obstante, el problema no sólo reside ahí, sino que se traslada a preocupaciones que involucran a la sociedad, situación que amplifica el alcance del problema hacia ámbitos que involucran a la ética, en el sentido de que hoy en día existe una tendencia a promocionar servicios de salud que se dicen estar

avalados por procesos científicos, uno que aquí hemos mencionado es el de la “medicina cuántica”.

La problemática para la divulgación de la ciencia surgirá en dos niveles: la primera problemática se le presenta al divulgador en el momento de determinar qué información es la correcta, es decir, en su labor de documentación previa; por otro lado, al momento de plasmar la información dirigida a un público, y brindarle las herramientas para que éste sea capaz de discriminar aquello que efectivamente sería científico de lo que pretende serlo.

La tarea a la que se enfrenta la comunicación de la ciencia es la de prever al público de la charlatanería, proporcionarles herramientas que le permitan juzgar aquellas afirmaciones que aparentan información absoluta y aparentan información científica. Quizá una vía a tomar sería narrarle al público el proceso arduo por el que tiene que pasar todo conocimiento científico, es decir, no solamente informar al público con datos, sino que, al proporcionarle la historia, el público pueda apreciar las reglas y métodos por los que pasa todo conocimiento científico, elementos que le permitan distinguir las dificultades que se atraviesan para llegar a ciertas conclusiones que no son absolutas, que las resoluciones pueden sufrir cambios graduales, situación que, de alguna manera imposibilitaría aquellas afirmaciones fuertes que se muestran como un conocimiento absoluto.



CAPÍTULO 4

ESTRATEGIA PARA UNA REPRESENTACIÓN DIVULGATIVA DE LOS
DEBATES FUNDAMENTALES DE LA FÍSICA CUÁNTICA

En el presente capítulo retomaremos los textos de divulgación que hemos analizado a lo largo de la tesis. Nos detendremos a examinar la arquitectura que caracteriza a estos textos y observaremos de manera rápida el estilo de exposición que cada uno de los autores utiliza. Por otro lado, abordaremos el contexto social en el que se encontraban los autores en el momento en el que aparecieron sus publicaciones; tomar en cuenta esto último nos permite descubrir al autor como figura de autoridad, característica que puede valorarse como un factor que favorece que las ideas se acepten, se propaguen y, en cierto sentido, persistan en el público no especializado.

La intención en este capítulo es distinguir y evaluar el tipo de divulgación que se presenta al lector en las publicaciones seleccionadas; a partir de ello, se expondrán los desafíos con los que el divulgador de la ciencia se enfrenta para representar la física cuántica a su público. Al reconocer dichos desafíos se propondrá una estrategia de comunicación divulgativa en la que se contemplan cuatro características de formación para el divulgador: entender la divulgación científica como una actividad para promover la cultura científica, conocer la ciencia que se va a divulgar, formarse en la filosofía e historia de la ciencia y contar con habilidades de comunicación. Estos componentes suponen otros elementos que en conjunto funcionarán como cimientos para construir el tipo de divulgación que proponemos; es decir, aquella en la que se evidencien las controversias que han surgido alrededor de los fundamentos de la teoría para evitar un estilo pragmático en la divulgación¹⁰⁸.

Es importante señalar que el tipo de divulgación al que apostamos no pretende relegar el hecho de que la física cuántica ha sido considerada, hasta el momento, la teoría más exitosa de la ciencia dada su capacidad predictiva, por la gran precisión en sus predicciones y su confirmación empírica, así como por los avances tecnológicos que se han derivado de ella. Lo que se busca es una divulgación que permita mostrar una imagen más real y compleja de cómo opera la ciencia.

¹⁰⁸ La divulgación pragmática la entendemos como aquella divulgación en la que solamente se muestran los resultados de la ciencia, en la que el relato histórico aparenta un progreso lineal y sólo presenta los pasaje exitosos, en la que se aparenta una imagen de la ciencia absoluta y llena de certezas, ocultando las controversias y las diversas posturas que han emergido en la búsqueda de una interpretación al formalismo de la teoría.

4.1

Reconstrucción de los modelos de divulgación utilizados en los textos divulgativos sobre física cuántica

A lo largo del capítulo nos enfocaremos a examinar la estructura narrativa o discursiva para exponer ciertos conceptos fundamentales, es decir, observaremos cuál es el modo de proceder de los autores en su escrito: los recursos narrativos que utilizan para mostrar al público dichos conceptos. De igual forma nos interesa reconocer la postura que los autores reflejan frente a las controversias de carácter filosófico que surgieron con los nuevos planteamientos de la física cuántica. Al considerar lo anterior, hablamos de una reconstrucción de los modelos de divulgación para la física cuántica.

Como ya se dijo, dos de las primeras publicaciones que buscaron exponer la teoría cuántica son: *La naturaleza del mundo físico* (1928) de Arthur Eddington y *El universo misterioso* (1930) de James Jeans. Ambas son transcripciones de conferencias dirigidas a un amplio público que fueron impartidas por los propios autores. Es relevante señalar que la práctica de hacer divulgación a partir de conferencias y después publicarlas en libros ya se había dado desde el siglo XIX; ejemplo de ello son las publicaciones de los físicos Michael Faraday, John Tyndall y el biólogo Thomas Henry Huxley. Tal ejercicio continuó en menor medida en el siglo XX. Un ejemplo de este mismo esquema son algunas de las publicaciones de Richard Feynman; como lo es *El carácter de la ley física* (1965) y *Seis piezas fáciles* (1994), este último se trata de una selección de sus famosas conferencias publicadas en *The Feynman Lectures on Physics* en 1964.

Por otro lado, encontramos publicaciones que se basan en un esquema de narración histórica, esto es, que muestran el desarrollo histórico de la física cuántica y exponen cómo se establecieron las concepciones fundamentales de esta teoría a partir de un relato que respeta una secuencia cronológica. De los textos que elegimos para esta investigación y que cumplen con esta característica encontramos *La física nueva y los cuantos* (1937) de Louis de Broglie, *La evolución de la física* (1938) de Albert Einstein y Leopold Infeld, y *Biografía de la física* (1961) de George Gamow. Es importante señalar que, de acuerdo con los propios autores, el propósito no se centra en mostrar ese recorrido histórico, sino en exponer las nociones de mayor relevancia y las nuevas concepciones del mundo físico que se derivaron

de la física cuántica. En este sentido, el propósito primordial de los autores no es mostrar la historia de la física cuántica, aunque utilizan este tipo de relato como una herramienta para lograr el objetivo que plantearon.

Otra forma de exposición se ha dado a partir de un relato o narrativa basada en ficción. Esto es, los autores crean historias de ficción en las que introducen y exponen los conceptos científicos. Como ejemplo de este tipo de divulgación tenemos los cuentos del señor Tompkins recopilados en *El nuevo breviario del señor Tompkins*, relatos que datan de 1939. Después de éste se han publicado otros libros que siguen este esquema: *Alicia en el país de los cuantos* (1994) del físico Robert Gilmore, *Uncle Albert and the Quantum Quest* (1994) de Russell Stannard, *Cómo enseñar física cuántica a tu perro* (2009) de Chad Orzel, entre otros.

A partir de lo anterior, diferenciamos tres esquemas expositivos en las publicaciones de divulgación sobre física cuántica: la exposición derivada de conferencias, el relato histórico y el relato narrativo a partir de la ficción. Esta clasificación solamente cumple con el propósito de identificar los esquemas que guían la exposición en las obras de divulgación. Considerando esto, analizaremos estos tres modos de proceder.

Exposición basada en conferencias

Como se ha dicho líneas atrás, la exposición divulgativa basada en conferencias está presente en los textos de Eddington, Jeans y Feynman, quienes en diferente medida expresan las distintas posturas filosóficas que surgieron con la nueva forma de comprender los fenómenos de la escala atómica, y quienes también dan a conocer sus propias reflexiones e interpretaciones al respecto.

Los tres libros –*La naturaleza del mundo físico*, *El universo misterioso* y *El carácter de la ley física*– comparten la estructura básica en el texto; dicha estructura descansa en el discurso de las conferencias dedicadas a un público no especializado. El público no especializado, en un primer momento, está conformado por aquellas personas interesadas en las conferencias, las cuales han de seguir objetivos particulares que responden a la organización de las instituciones que promovieron esos eventos. Por ejemplo: *La naturaleza del mundo físico* se derivó de *The Gifford Lectures*, cuyo objetivo, según su fundador, consistió en “promover y difundir el estudio de la teología natural en el sentido más amplio

del término, en otras palabras, el conocimiento de Dios" (The Gifford Lectures, 2017); *El universo misterioso* surgió de la *Rede Lecture* en la Universidad de Cambridge y *El carácter de la ley física* de *The Messenger Lectures* en la Universidad de Cornell, cuyo fundador, Hiram Messenger, indicó que esas conferencias se trataban de presentaciones que buscaban "elevar el estándar moral de la vida política, comercial y social". El hecho de que estas conferencias fueran organizadas y presentadas en una institución educativa nos indica que el público meta al que fueron dirigidos los discursos no abarcaba un público muy amplio, sino que se circunscribía a las particularidades de las propias conferencias: universitarios y académicos que estuvieran interesados en el tema.

Comencemos con la exposición de *La naturaleza del mundo físico* (1928) del físico inglés Arthur Eddington.

La naturaleza del mundo físico, Arthur Eddington

Esta obra se conforma por quince capítulos dedicados a exponer las nuevas ideas que surgieron de la teoría de la relatividad y de la teoría de los cuantos, que en palabras del autor "aportaron nuevos y extraños conceptos del mundo físico". La intención de Eddington es mostrar "las consecuencias filosóficas que se desprenden de los grandes acontecimientos científicos" de esos últimos años; además, trata de mostrar "la relación de la experiencia humana, incluyendo la religión" con esas nuevas perspectivas que estaban surgiendo desde la física. Para exponer esta última relación dedica los últimos capítulos de su libro.

La manera de dar paso al capítulo dedicado a exponer la teoría cuántica, el cual titula "La teoría de los cuantos", es presentar al lector el estado "desesperante de ignorancia" al que se enfrentaban los propios físicos cuando discutían sobre las ideas fundamentales de la física moderna. Con esa expresión nos muestra, en cierto sentido, la percepción que se tenía de los nuevos razonamientos que surgían de la física cuántica. Posteriormente, el autor expone el concepto de cuanto de acción como un elemento que permitiría crear los cimientos para la nueva física. Eddington toma el concepto de cuanto de acción como punto de partida para crear una narrativa, basada en la secuencia cronológica, de los nuevos planteamientos que se formaron a partir de dicho concepto, los cuales hoy se consideran como parte de la historia de la física precuántica, por ser explicaciones que cimentaron las bases de la física cuántica. Es importante señalar que la historia que Eddington desarrolla

está basada en presentar el cambio de ideas con respecto al pensamiento que se tenía desde la física clásica, y algo que caracteriza su exposición es que no refiere a los físicos o personajes que fueron parte de esta historia¹⁰⁹.

El estilo de su lenguaje es, en ocasiones, un tanto técnico, el cual se acompaña de ejemplos que pretenden proporcionar mayor comprensión de las explicaciones; sin embargo, también invita al lector “a considerar la parte matemática” para “apreciar el progreso constante durante ese tiempo”. Con esto, Eddington lanza una invitación a profundizar más allá de lo que él expone. En este sentido se puede decir que el físico inglés promueve una divulgación que incluye el uso de formulaciones matemáticas, idea que suele ser excluida y debatida en algunos estudios sobre divulgación científica, pues se reconoce que con el discurso divulgativo se busca una reformulación del lenguaje técnico a un lenguaje que sea comprensible para el público, lo que implicaría evitar las formulaciones.

Hay que destacar que Eddington no se limita a relatar la historia de la física cuántica a partir de exponer la evolución de las ideas, sino que también se detiene a presentar las dificultades que surgieron para comprender la nueva teoría, ya que los nuevos planteamientos “*chocaban* con las ideas preconcebidas”. Para el autor se trataba del “extraño mundo de la física cuántica”, cualidad que reitera constantemente. En las últimas secciones de su libro Eddington expone sus propias interpretaciones respecto a los nuevos planteamientos de la teoría.

A lo largo de su escrito se pueden identificar descripciones que son utilizadas a manera de explicaciones, en las que en ocasiones introduce analogías y metáforas con el propósito de favorecer el entendimiento. Por ejemplo, para presentar el modelo atómico de Bohr y explicar cómo en él interviene el cuanto de acción hace uso del sistema solar como analogía, modelo que ya es muy conocido y utilizado tanto en la divulgación como en la educación formal. Lo expone como sigue:

El sistema es [se refiere al sistema atómico del hidrógeno], pues, muy parecido al de un sol y un planeta; pero mientras que en el sistema solar la órbita del planeta puede ser de cualquier dimensión y de cualquier grado de excentricidad, la órbita del electrón está constreñida a adoptar una serie definida de tamaños y formas. En la teoría clásica del electromagnetismo, no hay nada que imponga semejante restricción; sin embargo, la restricción existe y se ha descubierto la ley que la impone. Lo que da origen a esta ley es el hecho siguiente: cuando el átomo dispone hacer algo en su interior, ese algo es siempre igual a h . Se excluyen las órbitas intermediarias porque implicarían fracciones de h , y h no puede dividirse. Sin embargo, hay una

¹⁰⁹ La exposición de Eddington la hemos clasificado como exposición de una conferencia por ser el objetivo inicial de su discurso, sin embargo, también cumple con las características de una narrativa histórica.

excepción. Cuando la energía ondulatoria sale del átomo o penetra en él, la cantidad de energía y su periodo deben corresponder exactamente a h ; pero en lo que respecta a sus disposiciones internas, el átomo no tiene inconveniente en admitir $2h$, $3h$, $4h$, etcétera, mas se resiste a admitir fracciones. Por eso el electrón puede elegir una u otra entre muchas órbitas que corresponden a diferentes múltiplos enteros de h . Designamos a esos múltiplos con el nombre de *números cuánticos* y decimos: una órbita de cuanto. (Eddington, 1938, p. 222)

En la anterior cita podemos observar el uso de la breve analogía para representar una imagen del átomo, la cual se acompaña de una breve explicación. Por otro lado, también se puede advertir que al electrón se le otorga cierta personificación —prosopopeya— en el momento en que éste tiene la capacidad de “elegir” entre una u otra órbita. Es importante señalar esto, pues se trata de una característica que frecuentemente se les atribuye a los objetos cuánticos y que es muy utilizada en el discurso de divulgación; sin embargo, un uso descuidado podría ocasionar interpretaciones erróneas de lo que se está comunicando. Sobre esto hablaremos más adelante.

A lo largo del texto de Eddington podemos observar en repetidas ocasiones este esquema: presenta un recurso literario, metáfora o analogía, y después dar una explicación o descripción de alguna idea o concepto y, en ocasiones, incorpora sus propias reflexiones al respecto.

El Universo misterioso; James Jeans

Ahora detengámonos en el libro *El universo misterioso* (1930) de James Jeans, constituido por cinco capítulos; los cuatro primeros dedicados a exponer la teoría de la relatividad y la teoría cuántica, así como “las discusiones filosóficas que surgen de ellas”. Para llegar a una discusión filosófica de estas teorías, Jeans nos advierte que primero es necesario que la ciencia muestre “todo en cuanto hechos comprobados e hipótesis provisionales” y a partir de ello ya se podría generar tal discusión; esto con el propósito de evitar reflexiones sin fundamento. Considerando esta idea, él decide exponer en el último capítulo sus propias interpretaciones y reflexiones filosóficas respecto a las nuevas ideas que surgieron con la teoría de la relatividad y la física cuántica.

En su tercer capítulo titulado “El mundo nuevo de la física moderna” presenta un relato para mostrar cómo se fueron modificando las explicaciones de los fenómenos naturales, desde las explicaciones a partir de los mitos con “los caprichos y pasiones de los dioses” hasta llegar a las explicaciones basadas en leyes, como la ley de causalidad. Después

de ello, Jeans se detiene para hablar de “la explicación dada por Max Planck a ciertos fenómenos de la radiación, [la cual] desafiaba las interpretaciones establecidas en la física clásica”, pues “no seguía un razonamiento mecánico, parecía imposible hacer conexión con cualquier línea de pensamiento mecánico, [...] pero que resultó brillantemente exitosa, y se convirtió en la moderna «teoría cuántica», uno de los grandes principios en la física moderna”.

Con lo anterior como preámbulo, Jeans expone las aportaciones de Einstein, Bohr y Heisenberg; esto es, la explicación del efecto fotoeléctrico, la descripción de los saltos cuánticos en los átomos y el principio de incertidumbre. A lo largo de su narración son recurrentes los ejemplos y la exposición de casos hipotéticos, así como la representación de analogías y metáforas, de modo que el lenguaje utilizado por Jeans se caracteriza por la carencia de vocabulario técnico.

Tanto en la publicación de Arthur Eddington como en la de James Jeans se promovió de manera evidente la ideología de cada uno de los autores. A partir de algunas afirmaciones se pueden percibir sus posturas filosóficas frente a la teoría. Eddington acepta que adopta una postura idealista frente a la teoría cuántica, mientras que Jeans señala que lo escrito en su último capítulo son sus propias interpretaciones, advirtiendo que dichas interpretaciones podrían ser cuestionadas por sus lectores. Como hemos señalado, estas posturas se reflejan en mayor medida en los últimos capítulos de cada uno de los libros, pero las reflexiones de sus autores no se limitan a estos espacios; ejemplo de ello se presenta en el momento de exponer el indeterminismo, pues ambos autores expresan su propia visión sobre el tema.

Para Eddington, la idea de un indeterminismo en la naturaleza significaba un abandono de la causalidad, situación que “no dejaba clara la distinción entre lo natural y lo sobrenatural [...] abriendo la puerta a los demonios del salvaje”; además, señalaba que la renuncia a la causalidad afectaría la “libertad de la mente y al espíritu humano” (1938, p. 341). Para el físico inglés, la mente sería capaz de decidir el comportamiento de los átomos e influir también en el comportamiento de un grupo grande de átomos. Este tipo de declaraciones reflejan su propia interpretación al respecto, sin embargo, es relevante señalar que tales afirmaciones pueden tomar cierto valor en el lector por provenir de una figura de autoridad o bien, por relacionarlas con ideas preconcebidas de los propios lectores, dichas situaciones han de promover un entendimiento desacertado sobre los alcances de la teoría.

Por su parte, James Jeans señaló que con el indeterminismo de Heisenberg parecía que “la naturaleza aborrece la exactitud y la precisión sobre todas las cosas [...] que la naturaleza no conoce nada, aparentemente, sobre medidas exactas” (Jeans, 1930, p. 23). Para este autor la falta de una causalidad estricta en la nueva física permitiría la existencia y participación de la conciencia junto con los atributos que se le asocian, como “el libre albedrío y la capacidad de modificar al universo en un grado pequeño a partir de nuestra presencia”, y frente a esto, la “nueva ciencia” no podría decir lo contrario, advertía el autor. Una cita que evidencia este tipo de pensamiento es la siguiente: “A través de estos átomos de nuestra mente se pueden afectar los movimientos de nuestro cuerpo y el estado del mundo que nos rodea” (Ibíd., p. 27). En este sentido, para Jeans las nuevas ideas de la nueva física abrirían el espacio para discusiones sobre el determinismo, pero también sobre el libre albedrío. Por último, James Jeans también concluye que los nuevos conceptos que se desprendieron de la física cuántica, al no tener un referente material, tendrían que ser considerados como estructuras del pensamiento puro (Ibíd., p. 122); así, al igual que Eddington, Jeans esbozó un razonamiento idealista con conclusiones antimaterialistas.

Años más tarde, ambos autores dedicaron otras publicaciones para exponer, de una manera más extensa, sus reflexiones filosóficas respecto a la nueva física. En el caso de Eddington, *La filosofía de la ciencia física* (1939); y James Jeans, *Física y filosofía* (1942).

El carácter de la ley física; Richard Feynman

Algunas de las conferencias de Feynman también fueron recopiladas para conformar libros de divulgación. La publicación que consideramos en esta investigación fue *El carácter de la ley física*, publicada en 1965. Recordemos que este libro surge de las conferencias que impartió en la Universidad de Cornell durante noviembre de 1964, las cuales recibieron una gran cantidad de asistentes y fueron grabadas y transmitidas por la reconocida cadena de televisión británica BBC, lo cual reflejó el gran alcance que se obtuvo con esta serie de charlas.

La publicación se compone de siete capítulos que corresponden a cada una de las conferencias. El capítulo dedicado a exponer la teoría cuántica se titula “Probabilidad e incertidumbre. La visión de la naturaleza a través de la mecánica cuántica”, y es en él donde nos detendremos.

En las primeras páginas del capítulo, Feynman advierte al lector que expondrá cómo es que procede la ciencia para explicar aquellos fenómenos de la naturaleza que no están al alcance de nuestra experiencia directa, o bien, “que no están al alcance de nuestra imaginación”, pero que con la ciencia sí es posible captar aquellas “cosas que sí están ahí”; con ello hace referencia a los objetos y fenómenos de la escala subatómica. Para presentar esto, comienza con un breve relato en el que nos muestra los cambios de razonamiento que se dieron a lo largo de la historia de la ciencia para entender la naturaleza de la luz; seguido a ello, nos ofrece descripciones para exponer el comportamiento dual de la luz, señalando que los fenómenos que ocurren en “las cosas a muy pequeña escala son, simplemente, distintos” a los que estamos acostumbrados. Antes de comenzar con la explicación de por qué sucede esto, Feynman advierte que no recurrirá a las analogías para ilustrar su presentación, pues señala que en el mundo microscópico no se puede esperar visualizar a los fenómenos a partir de nuestra intuición; a pesar de esa advertencia, a lo largo del texto se observa que este recurso sí está presente. Por ejemplo, en un pasaje nos dice que imaginemos “una ametralladora que dispara balas a través de un agujero en una plancha blindada”, esto para representar una fuente de luz, que podría ser un dispositivo que lanza un rayo láser; en otro lugar anuncia que al momento de hablar de partículas usará “la imagen de las balas, y cuando hable de ondas referirá a la imagen de las ondulaciones de la superficie del agua”.

Como se ha mencionado en varios momentos del segundo capítulo de esta tesis, Feynman se apoya en la descripción y explicación del experimento de la doble rendija para dar cuenta de las características fundamentales en los fenómenos atómicos, y con ello mostrar “las paradojas, los misterios y las peculiaridades de la naturaleza” a esa escala¹¹⁰. Considerando lo anterior, se puede observar que uno de los recursos utilizados por Feynman es un experimento mental acompañado de analogías y metáforas para ilustrar cómo los electrones pueden comportarse como ondas o partículas.

Por otro lado, en lo que respecta a la postura de Feynman sobre las controversias que surgen al tratar de comprender los fundamentos de la teoría, él nos dice “con toda tranquilidad que nadie entiende la mecánica cuántica” (2005, p.143), y agrega:

Voy a explicarles cómo se comporta la naturaleza. Si ustedes simplemente aceptan que las cosas pueden ser así, les va a parecer espléndido y maravilloso. Si pueden evitarlo, no insistan en

¹¹⁰ Se puede consultar una transcripción de este experimento en el APÉNDICE C.

preguntarse: ¿Cómo es posible?, porque se meterán en un callejón del que nadie ha conseguido salir todavía. Nadie sabe cómo es posible. (Feynman, 2005, p. 144)

A lo largo del texto se repiten declaraciones de este tipo que reflejan una postura pragmática en su exposición divulgativa, es decir, a pesar de mostrar el proceso de cómo se llega a cierto conocimiento y los alcances prácticos que éste tiene, minimiza las controversias a las que se llega cuando los resultados experimentales son examinados con mayor profundidad; esto es, se desestima presentar aquellas posturas que cuestionan la interpretación ortodoxa. Para Feynman es más conveniente adoptar una posición de aceptación, pues para él son “determinaciones de la propia naturaleza”. Esta postura hace recordar los argumentos de los integrantes de la escuela de Copenhague; declaraciones que han permitido que el razonamiento dado por la interpretación ortodoxa sea circunscrito dentro de una filosofía positivista, actitud que coincide con el enfoque filosófico que predominaba en la época durante la primera mitad del siglo XX. (Beller, 1999)

Como hemos visto, estas tres publicaciones: *La naturaleza del mundo físico*, *El Universo misterioso* y *El carácter de la ley física*, se caracterizan por ser el resultado de conferencias públicas, peculiaridad que hace resaltar el papel social que jugaron los conferencistas y autores de dichos libros. Es importante señalar que en el momento en el que se publicaron estos libros, los autores ya eran reconocidos por cierto público, factor que, en cierto grado, interviene en cómo se adopta el producto de divulgación y su contenido. Evaluar la percepción del público de los productos de divulgación es un tema muy amplio que valdría la pena analizar con mayor detenimiento, pero en la presente investigación sólo reflexionaremos sobre el rol de los autores, valorados como figuras de autoridad, considerándolos como un factor que favorece a que ciertas ideas o posturas hacia la física cuántica se propaguen y persistan en el público no especializado.

De acuerdo con esto, es importante señalar que en 1927, año en que Eddington dio las Conferencias Gifford en la Universidad de Edimburgo, él ya contaba con cierto reconocimiento público, pues tenía el cargo de secretario de la Real Sociedad Astronómica en Inglaterra en el que, durante su gestión, coordinó las expediciones del eclipse solar ocurrido en 1919, evento que proporcionó la evidencia que confirmaría la teoría de la relatividad general propuesta por Einstein, suceso que tuvo gran difusión a través de diversos medios a nivel mundial. Durante ese periodo, Eddington se destacó por promover

las relaciones científicas internacionales¹¹¹ y fomentar la divulgación de la teoría de la relatividad y la propia expedición como hechos vinculados con el desarrollo científico.

Por su parte, James Jeans también era un distinguido científico al momento de publicar *El Universo misterioso* en 1930, tanto por sus aportaciones a la investigación en cosmología como por sus anteriores publicaciones de divulgación. Al igual que Arthur Eddington también pertenecía a la Royal Society, y un par de años antes de publicar el libro *El Universo misterioso* había recibido el nombramiento real de caballero. Con esto, se podría afirmar que tanto Eddington como Jeans fueron científicos reconocidos por la sociedad inglesa, situación que tiene alcances en el ámbito de la percepción pública de la ciencia.

Ambos autores, tal como hemos señalado páginas atrás, expresaron sus propias interpretaciones y conclusiones con respecto a lo que hasta ese momento se conocía en la física cuántica; y ambos textos, *La naturaleza del mundo físico* y *El universo misterioso*, lograron grandes ventas (Bensaude-Vincent, 2003; Turney, 1999). Sobre esto, es importante señalar que el número de ventas no garantiza que el público haya leído y comprendido el contenido, pero sí nos habla, en cierto sentido, de la relevancia que tuvieron estos textos para la divulgación de la ciencia y el interés del público por la temática. No obstante, con el paso del tiempo la popularidad de los escritos fue disminuyendo. De acuerdo a Whitworth (1994)¹¹², la divulgación de Eddington y de Jeans se volvió menos interesante para los lectores y el encanto por las implicaciones filosóficas fue sustituido por la atención en las implicaciones sociales de la ciencia, además de que el estilo de divulgación se volvió más pragmático, es decir, se centró en mostrar el éxito de la ciencia sin considerar sus fundamentos. Esta tendencia aun es posible distinguirla en muchos de los trabajos de divulgación actuales.

Por otro lado, el reconocimiento de Richard Feynman al momento de la publicación de *El carácter de la ley física*, en 1965, se centraba, principalmente, en el mundo académico, tanto por sus investigaciones como por su peculiar forma de impartir las clases y charlas, en las que lograba mantener siempre la atención de la audiencia. En aquel periodo recibió diversas invitaciones para impartir cursos y conferencias en distintas universidades, una de

¹¹¹ Recordemos que en esa época había pasado poco tiempo de haber terminado la Primera Guerra Mundial, hecho histórico que también tuvo repercusiones en el campo de la ciencia. Por un lado, se vio un fenómeno de chovinismo entre los científicos de las naciones involucradas en la guerra, lo que provocó un desprendimiento entre las comunidades científicas; por otro lado, al finalizar la guerra, los gobiernos proporcionaron gran apoyo para las investigaciones de física militar siguiendo propósitos de seguridad. (Kragh, 2007, p. 132)

¹¹² En: Leane, 2007.

ellas fue por parte de *The Messenger Lectures* en la Universidad de Cornell; estas conferencias posteriormente se editarían para conformar el libro de divulgación *El carácter de la ley física*. En el mismo año en el que se publicó este libro, el físico estadounidense recibió el premio Nobel de Física por sus investigaciones en electrodinámica cuántica, situación que también contribuyó a que aumentara su popularidad. Años más tarde, en 1986, participó en la comisión dedicada a investigar el accidente ocurrido con el transbordador espacial Challenger, acontecimiento que también lo hizo salir a la luz pública en los medios de comunicación.

Considerando lo anterior, observamos que los tres autores a los que hemos hecho mención ya contaban con un reconocimiento público al momento de publicar los libros de divulgación seleccionados; tal particularidad podría respaldar el hecho de que los títulos divulgativos hasta aquí expuestos son reconocidos en la historia de la divulgación de la ciencia debido a la popularidad que alcanzaron, la cual está asociada al tiraje y a las ventas que lograron. Cabe reiterar que tal situación no nos dice mucho sobre el impacto en el público, pero sí nos habla de su relevancia para la divulgación científica y el interés por la temática. En este sentido, la popularidad de los textos se ve vinculada con el rol de figura de autoridad que los autores juegan frente al público lector, situación que también se asocia con el grado de aprobación del contenido presentado en los textos, en el que los autores tienen un espacio para exponer sus propias interpretaciones y conclusiones. Al hacer referencia a esto queremos hacer notar que surge la posibilidad de que la imagen de la ciencia que se le muestra al público —la cual está en función del discurso del autor y de sus ideales— podría tomar diversos significados por parte del público.

En resumen, hasta aquí hemos observado que las tres publicaciones surgen de los discursos de conferencias dedicados a un público amplio, en el sentido que fueron eventos abiertos para los estudiantes y académicos interesados, que no necesariamente contaban con la formación en física. En este sentido, es importante hacer notar el hecho de que en un principio fueron conferencias y después fueron valoradas para conformar un producto editorial nos habla, en cierto modo, de la importancia e interés por el tema tratado y el reconocimiento de los autores.

En relación con el estilo de la exposición, en un primer momento se observa que los tres autores presentan a la teoría cuántica con adjetivos de admiración y sorpresa debido a las diferencias entre la teoría cuántica y lo que se conocía desde la física clásica. Para exponer los conceptos de la teoría hacen uso de metáforas, analogías y figuras retóricas;

elementos muy utilizados en el género de la divulgación que en teoría permiten “comprender los conceptos más abstractos a partir de los más concretos, y relacionar un dominio conceptual en términos de otro” (Sánchez, 2010, p. 128). En cuanto a la presentación de las implicaciones filosóficas que se encuentran en los fundamentos de la teoría, vimos que Eddington y Jeans, además de evidenciar la extrañeza que provocaron los avances en esta área de la física, aportaron sus propias interpretaciones. Esa postura se contrapone con la exposición de Feynman, en la que hace alusión a las preguntas que se albergan en los fundamentos de la teoría pero las desvaloriza.

Exposición basada en el relato histórico

Ahora abordemos otro estilo de divulgación utilizado para presentar la física cuántica. Uno en el que el contenido se desarrolla a partir del relato de la historia de la ciencia, en este caso la historia de la física cuántica. Con esta característica encontramos las publicaciones *La física nueva y los cuantos* (1937) de Louis de Broglie, *La evolución de la física* (1938) de Albert Einstein y Leopold Infeld, y *Biografía de la física* (1961) de George Gamow. A continuación, observaremos aspectos generales sobre la forma como se dispone la información en cada una de estas publicaciones.

La física nueva y los cuantos; Louis de Broglie

La física nueva y los cuantos (1937), libro del físico francés, se compone de doce capítulos. A lo largo de todo el texto el autor busca evidenciar las diferencias entre las leyes en la física clásica y la teoría cuántica. Los primeros capítulos están dedicados a presentar algunas leyes establecidas en la física clásica; después dedica un capítulo para exponer la relatividad y los últimos capítulos los destina a presentar la física cuántica.

El punto de partida para presentar la física de los fenómenos a escala atómica es exponer el problema de la radiación del cuerpo negro y la solución que aportó Max Planck en 1900 a partir de la postulación de la constante de Planck. A partir de ahí muestra cómo fue evolucionando la física cuántica; retoma la teoría atómica de Bohr, presenta el principio de correspondencia también propuesto por Bohr, expone las relaciones de incertidumbre y la interpretación que aportó Heisenberg al formalismo matemático; también presenta su

propia contribución de establecer la dualidad onda-partícula en la materia. La exposición de cada uno de estos temas respeta la secuencia en que fueron apareciendo en la historia de esta ciencia.

Cada una de las secciones mantiene una relación con los apartados o capítulos anteriores, puesto que el mismo De Broglie hace referencias directas a pasajes mencionados con anterioridad. Esta característica obliga, de alguna manera, a una lectura continua del texto para no perder la articulación que se da con algunas explicaciones o conceptos. Si un lector principiante en estos temas opta por revisar pasajes de manera desordenada es probable que se pierda al intentar comprender, situación no deseable en un texto, en específico en uno clasificado como divulgativo.

El discurso en *La física nueva y los cuantos* se caracteriza por una exposición clara a lo largo de casi todo el texto. La mayor parte del texto está conformado por un discurso explicativo y descriptivo que en ocasiones se acompaña de figuras de analogías y metáforas. Todos estos elementos han de favorecer al entendimiento por parte del lector; sin embargo, es importante destacar que el lenguaje utilizado por el físico francés se caracteriza por respetar los tecnicismos, situación que podría delimitar al público general al que en principio pudiera estar dirigido, puesto que podría llegar a resultar complejo. El uso de este tipo de lenguaje contribuye a que el texto se asemeje, en algunos pasajes, a un libro de texto para los estudiantes en el área, desdibujando su carácter divulgativo dirigido a un público más amplio.

Algo que se destaca en la publicación de De Broglie es que en la primera edición él refleja su aprobación a la interpretación de Copenhague, situación que es posible leer en algunos fragmentos que se han mencionado en el segundo capítulo de esta tesis. Sin embargo, lo interesante se presenta en la segunda edición del libro, la cual apareció en 1973, 37 años después de la primera, en la que se agregó una introducción escrita por el propio Louis de Broglie y un prefacio escrito por el físico francés Georges Lochak, quien fue un colaborador muy cercano a De Broglie en sus últimos años de vida y quien en la actualidad es presidente de la Fundación Louis de Broglie. En esas nuevas secciones se le expone al lector el contexto en el que fue escrita la primera edición y cuál es el contexto de la nueva edición, con la intención de explicar el cambio de pensamiento del autor respecto a la interpretación de la teoría. Las expresiones de consentimiento hacia la interpretación de Copenhague que se leían en la primera edición, en la segunda no se encuentran. La postura que reflejaba una aprobación a la interpretación ortodoxa no siempre estuvo

presente en el pensamiento del físico francés. Él señala en la introducción para la segunda edición que años antes de publicar *La física nueva y los cuantos*, en sus “ideas primitivas” consideraba que la interpretación ortodoxa era incompleta y engañosa, pensamiento que volvió a De Broglie alrededor de 1948 al cuestionar “la exactitud de la naturaleza indeterminista y causal que se había atribuido a los fenómenos microfísicos”. En la introducción de la segunda edición escribe: “parte de lo que escribí en 1936 en el libro, actualmente [1973] no lo volvería a escribir [...] mi opinión ha cambiado por completo sobre todo lo que concierne a la interpretación de *la estructura formal de la teoría*, que es lo que se enseña”. (De Broglie, 1973)

El físico francés advierte que “gran parte de lo que contienen los capítulos del libro siguen siendo válidos y pueden leerse con confianza” e insiste en que es en el ámbito de la interpretación donde se observarán las diferencias entre la primera y segunda edición. Indica también que “las aplicaciones industriales *de esta ciencia* muestran un mayor progreso en comparación con las preguntas fundamentales” implicadas en la teoría, las cuales continuaron vigentes entre los físicos. Esta última aseveración de De Broglie aún puede aplicarse en la actualidad. Por otro lado, Georges Lochak también señaló que los avances experimentales que se habían desarrollado hasta ese momento, en 1973, permitieron corroborar la teoría desarrollada décadas atrás: “las leyes cuánticas y las propiedades ondulatorias de la materia, *ahora* están presentes en todas partes de la vida cotidiana [...] en transistores y circuitos integrados, *permitiendo* el desarrollo de la informática, la automatización, la radio y televisión”. Hablar de esto en la primera edición no era posible, puesto que “la teoría cuántica y la mecánica ondulatoria eran esencialmente un objeto de especulación que interesaba a unas pocas personas en el mundo”. (Ibíd.)

Entre ambas ediciones del mismo título se deja ver la transición de pensamiento que tuvo el físico francés; Lochak nos dice que “el autor discute consigo mismo refutando sus propias concepciones, desde el momento en que creía en las ideas de Bohr”. Para Louis de Broglie, la reflexión filosófica que puede surgir de la teoría se debe abordar con cautela, pues a menudo se da lugar a peligrosas extrapolaciones. Para prevenir esto, advierte que este tipo de conclusiones deben estar sujetas a la revisión del conocimiento científico; recordemos que este tipo de advertencia también se hace presente en el texto de James Jeans.

Por último, veamos, de manera breve, el reconocimiento público con el que contaba De Broglie al momento de publicar *La física nueva y los cuantos*. En 1936 el físico francés ya

había recibido el premio Nobel de física (1929) por su propuesta de la característica dual de la materia. Años más tarde, en 1952, fue el primero en recibir el premio Kalinga, un reconocimiento otorgado por la UNESCO para las labores de divulgación científica. Además, tenía una cátedra en la Universidad de la Sorbona y era miembro de la Academia de Ciencias de Francia. Con este contexto volvemos a afirmar que fue un personaje reconocido en el ámbito público, situación que se puede considerar como un factor relacionado con la recepción del contenido de sus trabajos de divulgación, en específico con la segunda edición de *La física nueva y los cuantos*.

La evolución de la física; Albert Einstein y Leopold Infeld

La evolución de la física (1938) se compone de cuatro capítulos. En los primeros tres los autores hacen un recorrido histórico de la física a partir del siglo XVII con las aportaciones de Galileo, y posteriormente presentan los razonamientos de Newton, para después, en el último capítulo, situarse en el siglo XX con la teoría de la relatividad de Einstein y la teoría cuántica.

Es importante hacer mención de dos preguntas que los autores comparten con el lector antes de comenzar la exposición de los capítulos: “¿con qué propósito se ha escrito este libro? y ¿quién es el lector imaginario para el cual se escribió?”. Ambas cuestiones nos dan información relevante respecto a la estructura y el estilo del libro. Para responder a la primera pregunta nos dicen:

Nos resulta más sencillo decir lo que este libro no pretende ser. No hemos escrito un texto de física. Nuestra intención fue, más bien, describir a grandes rasgos las tentativas de la mente humana para encontrar una conexión entre el mundo de las ideas y el mundo de los fenómenos [...] Del laberinto de hechos y conceptos hemos tenido que elegir algún camino real que nos pareció más característico y significativo [...] Nos vimos forzados por nuestro objetivo general a efectuar una selección cuidadosa de hechos e ideas. (Einstein e Infeld, 1993, p. IX)

La exposición, entonces, consistirá en mostrar las explicaciones dadas por la física para algunos fenómenos siguiendo un orden cronológico, lo cual es posible percibir desde el índice del libro. Cabe destacar también que el propósito de los autores es explicar las ideas fundamentales que subyacen en los hechos que se explican con la teoría cuántica, dejando de lado las descripciones de los experimentos (Einstein e Infeld, 1993, p. 201). Ahora bien, para responder a la segunda pregunta, nos dicen:

Mientras escribíamos este libro hemos tenido largas discusiones sobre las características de nuestro lector ideal y nos hemos preocupado bastante de él. Lo imaginábamos falto de todo conocimiento concreto de física y matemáticas, pero lleno de un gran número de virtudes. Lo encontrábamos interesado en las ideas físicas y filosóficas [...] Se daría cuenta de que para comprender cualquier página tendría que haber leído cuidadosamente todas las anteriores. Sabría que un libro científico, aunque popular, no debe leerse como una novela. [...] Nuestro objetivo se habrá cumplido si estas páginas le dan una idea de la eterna lucha de la inventiva humana en su afán de alcanzar una comprensión más completa de las leyes que rigen los fenómenos físicos. (Einstein e Infeld, 1993, p. IX)

En esta cita, me parece, hay dos ideas importantes a destacar por estar relacionadas con la presente tesis. La primera es que ellos imaginaban a un público que estuviera interesado en las ideas físicas y filosóficas; con dicho señalamiento se supone que en el contenido del libro encontraremos planteamientos que muestren el vínculo de ambas disciplinas, para satisfacer ese interés. También podemos suponer que, en cierto grado, los autores se interesan por una divulgación de la física cuántica en la que se contemplen los aspectos filosóficos implicados en la teoría; y con ello podríamos trazar una relación con el tipo de divulgación que se busca fomentar en esta tesis. La segunda idea mencionada por los autores y que es relevante para los propósitos de esta tesis es que “un libro científico, aunque popular, no debe leerse como una novela”. Debido a que los autores no desarrollan esta afirmación de manera inmediata surgen las preguntas ¿a qué se refieren con ello?, para ellos ¿qué caracteriza la lectura de novelas?; las respuestas a estas preguntas aparecen en una sección posterior, un par de páginas más. Ahí nos indican que la distinción que ellos hacen entre la exposición de la ciencia y la exposición de una novela radica en el cómo son presentados los eventos.

Para mostrar esas diferencias, describen cómo los autores de las típicas novelas de misterio presentan la narración, y toman a Arthur Conan Doyle como ejemplo para describir el modo de proceder en la narración de novelas:

[En las novelas de misterios] presentan todos los datos y pistas esenciales [que] nos impulsan a descifrar el misterio por nuestra cuenta. Siguiendo la trama cuidadosamente, podremos aclararlo nosotros mismos un momento antes de que el autor nos dé la solución final de la obra [...] nos resulta perfectamente lógica; más aún, aparece en el preciso momento en que es esperada. (Einstein, A., Infeld, 1938, p. 4).

Para los autores, lo anterior no refleja lo que sucede en la historia de la ciencia, en donde los resultados no aparecen de manera repentina, no aparecen en el momento

preciso; el punto de encuentro entre los investigadores de esas historias y los científicos es que ambos buscan resolver algún misterio. Los misterios que la ciencia busca resolver se refieren a “los misterios del gran libro de la naturaleza”, los cuales difícilmente tienen una solución final, puesto que nunca se llegan a comprender en su totalidad. La búsqueda por comprender la naturaleza y sus misterios ha implicado que se desarrollen diversos volúmenes de esa historia:

En cada etapa tratamos de encontrar una interpretación que tenga coherencia con las claves ya resueltas. Provisionalmente se han aceptado teorías que han explicado muchos hechos, pero no se ha encontrado aún una solución general compatible con todas las claves conocidas. Muy a menudo una teoría que parecía perfecta resultó, más adelante, inadecuada a la luz de nuevos e inexplicables hechos. Cuanto más leemos [el libro de la naturaleza], tanto más apreciamos la perfecta realización del libro, aun cuando la solución completa parece alejarse a medida que avanzamos hacia ella. (Einstein, A., Infeld, 1938, p. 4)

Para Einstein e Infeld en las historias de misterio de las novelas, como las que relata Arthur Conan Doyle, es común ver que repentinamente Sherlock Holmes llega a la respuesta del enigma después de largos momentos de meditación sobre los datos y hechos recabados como evidencia, que a primera vista no mostraban tener relación alguna. Así, de manera precipitada, el protagonista logra mostrar los vínculos y resuelve el caso. Sin embargo, esta manera de proceder no se observa en el quehacer de la ciencia. Lo que sucede en la historia de la ciencia es que los científicos “leen el libro de la naturaleza” con la intención de resolver “los misterios de la naturaleza”; la búsqueda de la solución del misterio recae en el científico “porque no pueden saltar hacia el final del libro [...] el hombre de ciencia debe reunir los desordenados datos disponibles y hacerlos comprensibles y coherentes mediante el pensamiento creativo”. En el momento en el que se llega a una solución, solamente se ha de considerar como una explicación parcial de alguna porción de la naturaleza, pero no de toda la naturaleza.

Otra diferencia que señalan es que el investigador en las historias de misterio de ficción verifica la teoría que ya había desarrollado en el momento en el que logra “ver claramente la relación entre los hechos”. Tal situación, señalan, no se ve en el desarrollo de la ciencia, pues hay ocasiones en que los hechos habrán de refutar alguna teoría. Esto es, en las historias de ficción o novelas, como las llaman Einstein e Infeld, el proceder de la ciencia o de una investigación se presenta de una manera muy ficticia, donde el proceso de

la ciencia se representa con alteraciones, dado que no se perciben los recovecos que aparecen en el proceso científico.

Es en este sentido en el que Einstein e Infeld nos dicen que “un libro científico, aunque popular, no deberá leerse como una novela”. Estamos de acuerdo en que la historia de la ciencia no acontece de la misma manera como se expresa en los relatos de ficción que nos describen, por lo que este tipo de narración no describiría fielmente el proceso de la ciencia. Sin embargo, es posible cuestionar esta afirmación desde una perspectiva teórica de la comunicación de la ciencia, y considerar a la narrativa como una herramienta para exponer la ciencia en el género de la divulgación. Para ello retomaremos la representación que López Beltrán (1983) hace de la actividad de divulgar ciencia. Él nos dice que esta actividad se trata de transmitir el conocimiento científico a un público no especializado en donde se obedezca al rigor y a la amenidad. En este sentido, la dualidad rigor-amenidad en la divulgación implicaría una disputa entre ambos requerimientos, en la que uno de estos factores tendrá mayor peso según el objetivo que se persiga con el producto de divulgación, pero se deberá cuidar que no se anule al otro factor. De modo que, si se busca cumplir con dicha dualidad, la divulgación en un formato de novela, retomando el término de Einstein, tendría que ser posible. En ella, la narrativa de ficción que se desarrolle deberá ser atractiva para el lector sin perder el equilibrio con el rigor científico del conocimiento que se pretende transmitir. Aquí no desarrollaré esta idea por no corresponder al objetivo de esta sección, pero más adelante, en el apartado titulado “La narrativa como un recurso para la divulgación de la ciencia” profundizaremos en ella.

Volvamos al texto de Einstein e Infeld para observar cómo está estructurado su contenido y cómo los autores presentan algunas concepciones de la teoría. Nos situaremos en el último capítulo titulado “Los cuantos”. En la primera sección de este capítulo nombrada “Continuidad y discontinuidad”, los autores presentan una descripción de una especie de experimento mental. Exponen una situación imaginaria en la cual tenemos un mapa de cierta ciudad, y frente a este mapa, surgen las preguntas: ¿a qué puntos de este mapa puede llegarse en tren?, ¿a qué puntos se podrá llegar viajando en coche? Nos indican que los destinos a los que se puede llegar en tren se pueden ver marcados en el mapa como puntos separados entre sí, cada punto representa a cada una de las estaciones; mientras

que con el coche se podría llegar a todos los puntos que conforman las líneas que dibujan los caminos en el mapa¹¹³.

Al considerar lo anterior nos hacen ver la diferencia entre los conceptos de “continuidad” y “discontinuidad”. Para reforzar estos conceptos plantean dos analogías en las que podemos observar de nuevo las diferencias entre los cambios de magnitud de manera continua y discontinua. Después de mostrar las diferencias entre los conceptos concluyen que “la idea principal de la teoría de los cuantos es admitir que ciertas magnitudes físicas consideradas hasta el presente como continuas están compuestas de cuantos elementales” (Einstein e Infeld, 1993, p. 200).

Las secciones posteriores llevan los siguientes títulos: “Los cuantos de luz”, “Los espectros de rayas”, “Las ondas de materia”, “Ondas de probabilidad” y “Física y realidad”. En todas ellas se procede de manera similar a la que acabamos de describir: enfrentar al lector a casos hipotéticos en los que surgen algunas preguntas que derivan en conclusiones que están vinculadas con la teoría cuántica. A lo largo de sus argumentos se apoyan en analogías para reforzar algunas de las ideas o conceptos expuestos.

En las últimas dos secciones los autores se preocupan por enfatizar algunas diferencias entre la teoría cuántica y la física clásica; dichas diferencias son las que desencadenarían debates y preocupaciones con orientación filosófica. Algunas de las distinciones que los autores resaltan son las siguientes: que el significado interpretativo que surge de la teoría cuántica posee una mayor abstracción en comparación con lo que se observa con la física clásica; señalan el abandono de leyes para objetos individuales por el acogimiento de leyes de probabilidad para una multitud de objetos en el nivel atómico. Respecto a esto, nos dicen que la física cuántica “no describe propiedades, sino probabilidades, no tenemos leyes que revelen el futuro de los sistemas, sino leyes que expresan las variaciones en el tiempo de las probabilidades y que se refieren a conjuntos o agregaciones de un gran número de individuos” (Einstein e Infeld, 1993, p. 239). Por otro lado, también señalan que la física cuántica “nos aleja más y más de la clásica concepción mecanicista, y el retorno hacia el punto de vista anterior parece, hoy más que nunca, improbable”.

¹¹³ Cfr. Sección destinada a *La evolución de la física* dentro en 2.1 “Representación del comportamiento dual de los componentes mínimos de la materia en física cuántica a través de textos divulgativos”.

Los autores indican que “todo avance importante trae nuevas preguntas, todo progreso revela, a la larga, nuevas y más hondas dificultades” (Ibíd., 1993, p. 235); con ello, hacen referencia, de manera muy velada, a las implicaciones y controversias que se desprenden de las diferencias entre la física clásica y la cuántica que ellos muestran en el texto y, además, hacen alusión a la idea de que el camino que recorre la ciencia no se lineal y que en ocasiones se encuentra con dificultades. Pese a los conflictos por los que atraviesa la ciencia, sostienen su “creencia en una armonía interior en nuestro mundo [que es la] motivación fundamental de toda creación científica”. Con este tipo de declaraciones, además de expresar que “la física cuántica está a la espera impaciente de una solución”, se puede percibir cierta oposición a considerar la interpretación ortodoxa como concluida, postura que recibió diversas críticas por parte de Einstein.

Algo que se puede destacar del texto de Einstein e Infeld es lo siguiente: en *La evolución de la física*, los autores tienen una mayor disposición, en comparación con los otros autores que hemos abordado, para hacer referencia a los debates que se derivaron de las nuevas ideas en la física cuántica; sin embargo, no se profundiza en tales reflexiones.

Biografía de la física, George Gamow

Otro de los textos cuya estructura está basada en el desarrollo histórico de la física es *Biografía de la física* (1961) de George Gamow. Este libro está compuesto por ocho capítulos que exponen la historia de la física desde los primeros razonamientos de los griegos hasta llegar a las investigaciones en física de partículas en el siglo XX. La táctica de exposición de Gamow es mostrar a las figuras científicas más representativas y sus contribuciones; advierte que en su texto omitirá algunos personajes y temas que podrían ser consultados en cualquier libro de texto. La finalidad principal de este libro es que “los jóvenes lectores sientan el impulso de estudiar física [... y acercarlos a] lo que es la física y qué clase de hombres son los físicos” para fomentar el interés y que “busquen otros libros más sistemáticos sobre el tema”. (Gamow, 2010)

Lo que hace Gamow en su exposición es construir una narrativa alrededor de los personajes, en este caso los físicos, y los experimentos que diseñaron. En este sentido, en su capítulo titulado “La ley de los cuantos” la narrativa comienza con Demócrito y sus razonamientos sobre los componentes mínimos de la materia. Sólo dedica un par de párrafos a ello y da un salto en el tiempo para situarse a finales del siglo XIX, cuando el

interés de los físicos se centraba en “el paso de la electricidad a través de los gases”. Después desarrolla otra sección titulada “La catástrofe ultravioleta”; ahí, recordemos que Gamow menciona que “los físicos estaban sufriendo la angustia de la metamorfosis que va desde la larva clásica a la mariposa moderna”¹¹⁴. Con esa frase introduce el apartado, y en ese momento no nos dice en qué consiste dicha metamorfosis, sino que expone la incógnita a la que se enfrentó James Jeans: “si la distribución de energía en el caso de la radiación está sujeta a las mismas leyes estadísticas que la distribución de la energía entre las moléculas de gas”.

Como paréntesis, recordemos que la distribución de la energía entre moléculas de gas ya había sido explicada por James Clerk Maxwell durante la segunda mitad del siglo XIX. Él propuso que la energía de las moléculas de los gases con las que se mueven es variable; en este sentido, las moléculas se mueven a cualquier velocidad posible en función a la temperatura y las colisiones entre ellas. Habrá algunas moléculas que se muevan a mayor velocidad que otras, pues sería imposible que todas las moléculas mantuvieran una misma velocidad. Considerando esto, habrá un mayor número de moléculas que se muevan a una velocidad media. Al tomar en cuenta lo anterior, Maxwell llegó a graficar este comportamiento con una curva en forma de campana; así, el área bajo la curva representaría el número de moléculas a una velocidad dada y a cierta temperatura. La gráfica se volverá más pequeña y ancha a mayor temperatura, y a menor temperatura la gráfica se vuelve más alta y angosta, como se muestra en la siguiente imagen:

¹¹⁴ Cfr. Sección “Snooker cuántico” (1940) y Biografía de la física (1961) de George Gamow” en 2.1 “Representación del comportamiento dual de los componentens mínimos de la materia en la física cuántica a través de textos divulgativos”.

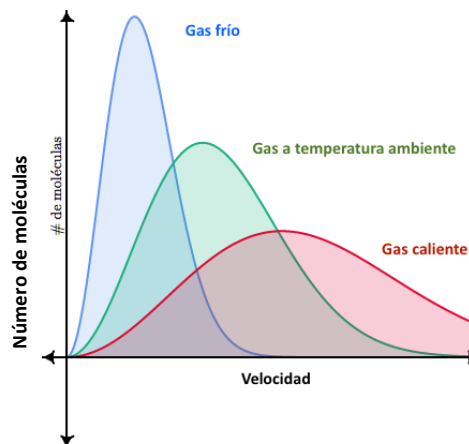


Fig. 3

Distribución de velocidad de las moléculas en un gas a diferentes temperaturas

Ahora bien, teniendo presente lo anterior, Gamow nos indica que Jeans se preguntó si las mismas leyes estadísticas que describían este fenómeno funcionaban también para la radiación. Para precisar un poco más esta cuestión, Gamow expone el experimento mental del “cubo de Jeans”, también conocido como el experimento del cuerpo negro, con el que se analiza el fenómeno de la distribución de la energía de un objeto¹¹⁵. La conclusión del experimento es paradójica “al aplicar las leyes más fundamentales de la física clásica a la energía radiante”. Esto es: con las teorías de la física clásica que se tenían en aquella época, basadas en un modelo de continuidad, se preveía que la radiación o distribución de la energía de los cuerpos debía aumentar indefinidamente cuando la longitud de onda disminuyera, o en otros términos, cuando hubiera un aumento de temperatura. Así, al tener un objeto al cual se le suministra calor, se decía que dicho objeto iría aumentando de temperatura y con ello la cantidad de energía emitida por el cuerpo podría llegar a ser infinita; no obstante, es evidente que esta situación no se presenta en la naturaleza y se trata de una conclusión que por sí sola es inverosímil.

Posteriormente, Gamow expone la solución que dio Max Planck a la paradoja en 1900, quien concluyó que la radiación estaba compuesta por paquetes individuales de energía, o lo que es equivalente, por cuantos de energía, es decir, se adoptaría un modelo de

¹¹⁵ Cfr. Sección “Problemas teóricos y experimentales que propiciaron un nuevo entendimiento en la naturaleza microscópica: radiación del cuerpo negro y catástrofe ultravioleta” en 2.1: Representación del comportamiento dual de los componentes mínimos de la materia en la física cuántica a través de textos divulgativos.

discontinuidad. Dicha conclusión desencadenaría polémica entre los físicos por implicar ideas distintas a las de la física clásica.

El relato histórico de Gamow prosigue de la siguiente manera: la solución que dio Einstein al “efecto fotoeléctrico”, quien se apoyó en la contribución de Planck; presentación del modelo atómico de Bohr; las ondas de materia propuestas por Louis de Broglie y finaliza con el aparato matemático que desarrollaron Heisenberg y Schrödinger.

El autor continúa con una sección en la que se abordan ciertas cuestiones de sentido interpretativo que preocupaban a los físicos de esta área: “¿Cuál es el significado de las ondas de De Broglie que guían a las partículas materiales en su movimiento? ¿Son ondas reales como las ondas de la luz o simplemente ficciones matemáticas introducidas por conveniencia para describir los fenómenos físicos del microcosmos?” (Gamow, 2010, p. 330). Para Gamow, Heisenberg daría respuesta a estas preguntas al “ir directo a la raíz del problema”, el cual emergía del “intento de aplicar las normas y métodos ordinarios de observación a fenómenos que se realizan en escala atómica”.

Lo que es importante destacar en esta ocasión es cómo Gamow muestra las controversias que se suscitaron a partir de la interpretación de la teoría. Una de las primeras preguntas que el autor presenta es la siguiente: “¿Es la función de onda que guía la trayectoria de una partícula material, una *entidad física* definida que existe en el mismo sentido que existen los átomos de sodio o de un proyectil cohete intercontinental?”. Ante este cuestionamiento, Gamow indica que la respuesta depende de lo que se quiere decir con la palabra “existencia”:

Las funciones de onda «existen» en el mismo sentido que las trayectorias de los cuerpos materiales. Las órbitas de la Tierra o de la Luna en torno a la Tierra *existen* en el sentido matemático de que representan el continuo de puntos ocupados consecutivamente por un cuerpo material en movimiento. Pero *no existen* en el mismo sentido que la vía férrea que guía el movimiento de un tren. En particular, la función de onda no tiene masa, no siendo más que una trayectoria difuminada. (Gamow, 2010, p. 336)

Más adelante, Gamow señala que Bohr había “desarrollado una nueva filosofía de la física” basada en las relaciones de incertidumbre de Heisenberg. En esa “nueva filosofía de la física”, se reclamaba un cambio profundo de las ideas del mundo material, “ideas que, señala el autor, adquirimos en la experiencia ordinaria desde la infancia. Pero permite dar sentido a muchos rompecabezas de la física atómica” (Gamow, 2010, p. 337). Para Gamow, la nueva filosofía de la física desarrollada por Bohr había sido aceptada y adoptada por

muchos; sin embargo, menciona que tuvo también algunos detractores, como Albert Einstein. Gamow, haciendo referencia a los famosos debates entre Bohr y Einstein, señala que la convicción filosófica de Einstein sobre el determinismo “no le permitía elevar la incertidumbre a un principio”.

Para Gamow, los intentos de Einstein por “descubrir contradicciones en el principio de incertidumbre” no llevaron “más que a robustecer dicho principio”, expresión que apoya a su percepción de que la interpretación dada por Bohr resultó triunfante frente a la visión de Einstein. Con ello se percibe que la historia que cuenta Gamow favorece a la interpretación dada por Bohr: en ciertos pasajes alude a las críticas que recibió esta interpretación por parte de Einstein, sin embargo, asume que dicha interpretación es la correcta, y en ese sentido, no manifiesta que se trata de un tema no concluido.

En el momento en que fue publicado *Biografía de la Física*, Gamow ya era conocido tanto por sus trabajos sobre el origen del universo como por los diversos textos de divulgación que comenzaron a distribuirse desde la década de 1930, situación por la que le otorgaron el premio Kalinga en 1956. Otra circunstancia relevante es que George Gamow fue discípulo de Bohr en el periodo de 1929 a 1931. El físico ruso había sido invitado por Bohr al Instituto de Física Teórica de la Universidad de Copenhague; suceso que marcó el inicio de una amistad entre ambos, manteniendo comunicación a través de correspondencia. Tal situación podría ser un factor para respaldar la interpretación de Copenhague.

Por último, es importante señalar que a lo largo de la exposición de Gamow se destacan las descripciones de los experimentos mentales; y, además, en diversas ocasiones opta por describir una formulación matemática en vez de expresarla con las ecuaciones. Al igual que los otros autores que hemos abordado se destaca el uso continuo de metáforas y analogías dentro de su discurso.

Exposición basada en narrativa de ficción

El breviario del Señor Tompkins, George Gamow

Para finalizar esta sección retomaremos dos cuentos de George Gamow que fueron recopilados en *El breviario del Señor Tompkins: “Snooker cuántico”* y *“El safari cuántico”*.

En este tipo de texto Gamow busca exponer algunos conceptos de la teoría cuántica a partir de un relato de ficción.

La historia del cuento “Snooker cuántico” se desarrolla en una conferencia impartida por un profesor de física en la que este personaje expone la teoría cuántica; uno de los asistentes es el señor Tompkins, el personaje principal de los cuentos. En esa conferencia, el profesor presenta algunas de las diferencias entre los supuestos de la física clásica y la cuántica: muestra la conclusión a la que llegó Planck respecto al equilibrio entre materia y radiación; la explicación del efecto fotoeléctrico dada por Einstein; el modelo atómico propuesto por Bohr; la concepción de la naturaleza ondulatoria de la materia propuesta por Louis de Broglie, y hace alusión a su comprobación experimental. Después de haber presentado lo anterior, el profesor propone a su audiencia un experimento imaginario para mostrar el concepto de trayectoria y las perturbaciones que se generan al intentar mirar u observar la trayectoria de los objetos en escala microscópica; a partir de ese experimento imaginario el autor introduce la noción de incertidumbre.

Una característica que sobresale en la exposición de Gamow es que la descripción del experimento imaginario está acompañada por ilustraciones que permiten al lector visualizar lo que está expuesto en el relato. Esta característica es destacable pues muchas veces se dice que la mecánica cuántica, al tratarse de una teoría no intuitiva, sería difícil de representarse por mostrar fenómenos con los que no convivimos. A pesar de ello, con las ilustraciones de los cuentos de Gamow se facilita que el lector forme una imagen de lo que se está describiendo y así, motivar de cierta manera el entendimiento.

En medio de la conferencia el señor Tompkins está por quedarse dormido, esto da pie para que el narrador describa uno de los sueños del señor. Recordemos en qué consiste este sueño¹¹⁶. En él, el señor Tompkins está en un bar en el que hay una mesa de billar donde algunos hombres juegan *snooker*. Mientras Tompkins miraba el juego notó que las bolas de billar se comportaban de manera extraña; cuando las bolas empezaban a moverse, “éstas comenzaban a esparcirse [...] parecían cada vez más y más imprecisas, perdiendo sus contornos nítidos. Parecía que sobre la mesa no rodaba una bola, sino un gran número de ellas, y que todas se penetraban parcialmente entre sí”. En el momento en el que el jugador golpea una de las bolas “parecía haber una multitud de ellas, todas de contornos vagos y

¹¹⁶ Parte de este sueño también lo presentamos en 2.3 “Representación del papel del observador y los instrumentos de medición a través de textos divulgativos”, dentro de la sección dedicada a exponer los cuentos “Snooker cuántico” y “El safari cuántico” (1940).

turbios, que se precipitaban dentro de un ángulo de 180° en torno de la dirección del impacto original. Parecía una onda que se propaga desde el punto del choque, con un flujo máximo de pelotas en la dirección de impacto original” (Gamow, 2009, p. 146). Con esto, el narrador ilustra con una analogía, a través de las visiones del señor Tompkins, el “comportamiento” de las ondas de probabilidad; crea una imagen de un concepto abstracto.

En el mismo sueño, y para sorpresa del señor Tompkins, el profesor de física y expositor de la conferencia se encontraba a sus espaldas cuando observaba el juego de snooker, y éste le comienza a explicar por qué las bolas de billar se esparcían de esa manera. El señor Tompkins se pregunta: “¿pero está en realidad *físicamente* en todos esos lugares al mismo tiempo?”. El profesor contesta: “tal vez sí, tal vez no”, y agrega que “la interpretación de la física cuántica siempre ha sido tema de debate [en el que] no hay consenso al respecto”. En este contexto el profesor comienza con sus explicaciones, como si estuviera dando una conferencia o clase al señor Tompkins para dar cuenta del principio de incertidumbre. Poco después Tompkins despierta y se da cuenta de que el profesor precisamente estaba hablando de ello en el auditorio, pero a diferencia del sueño, ahora la explicación se acompañaba de formulaciones matemáticas.

Ahora veamos brevemente el cuento titulado “Safari cuántico”¹¹⁷. Recordemos la narración que nos presenta Gamow. El señor Tompkins viaja con el profesor a la selva cuántica, lugar donde “todo está sujeto a leyes cuánticas con un valor muy grande para la constante de Planck [...] pero no lo bastante grande para producir efectos notables en el comportamiento de un animal tan enorme como un elefante”. El profesor acompañado del señor Tompkins y de un joven guía montan un elefante para adentrarse en la selva cuántica. En esta travesía Gamow, a través del narrador, vuelve a describir los efectos de observar los objetos cuánticos; en esta historia los objetos cuánticos serían todas las cosas que se encuentran en la selva cuántica. Para evidenciar esto, Gamow señala que el señor Tompkins se percató de que al observar o mirar las hojas de los árboles, éstas comenzaban a vibrar. Frente a este hecho, el señor Tompkins pregunta al profesor si ese mismo comportamiento sucedía cuando no se les observaba: “¿Quién podría decirlo?... si nadie está mirando, ¿quién puede saber cómo se comporta?”, responde el profesor. Al señor Tompkins le

¹¹⁷ Se presentó un fragmento de este sueño en 2.3 “Representación del papel del observador y los instrumentos de medición a través de textos divulgativos”, dentro de la sección dedicada a exponer los cuentos “Snooker cuántico” y “El safari cuántico” (1940).

parece una respuesta de corte filosófico, pero al profesor le resultan “preguntas sin sentido... pues en la ciencia nunca se debe hablar de las cosas que no pueden ser demostradas de forma experimental”. El profesor prosigue diciéndole que “para el físico moderno, lo único que tiene significado es lo que se conoce como los observables, es decir, los resultados de mediciones” (Gamow, 2009a, p. 163). En este pasaje es posible entrever que lo que Gamow está proyectando a partir del personaje del profesor está vinculado a la interpretación ortodoxa, una postura que también se observó en *Biografía de la física*.

En el relato de ambos cuentos se evidencia un mayor uso de analogías y metáforas que ayudan a ilustrar ciertas ideas. Por ejemplo, para describir una “nube de probabilidad de los electrones”, Gamow emplea una analogía de cómo se forma una “nube de probabilidad de un insecto” en el momento en el que uno los personajes miran al insecto. Esta analogía también está acompañada con una ilustración que busca contribuir al entendimiento del lector. Por otro lado, Gamow también se apoya en la descripción del experimento de la doble rendija, pero con la diferencia que lo hace a través de una metáfora con leonas y gacelas; las gacelas hacían referencia a las partículas que se comportan como ondas, y las leonas referían a los cálculos necesarios para detectar la trayectoria de las gacelas.

Veamos con más detalle cómo lo expone:

[...] En ese momento salieron de aquel bosque y se encontraron en una alta meseta que dominaba el campo abierto. El llano que veían a sus pies estaba dividido en dos por una densa hilera de árboles que bordeaban el lecho seco de un río y se extendía hasta perderse en la lejanía.

–¡Miren, hay muchas gacelas! –dijo el profesor muy animado, señalando una manada de gacelas que pacían con tranquilidad a la derecha.

Pero el señor Tompkins se concentraba en un grupo de leonas que estaban al otro lado de la hilera de árboles. Después, un poco más adelante, distinguió otro grupo igual... y otro y otro... Los grupos de leonas estaban dispuestos en una línea recta, paralela a la hilera de árboles. Además, entre todos los grupos había exactamente el mismo espaciamiento [...] Todas las leonas miraban con expectación hacia dos pequeñas brechas donde se interrumpía la hilera de árboles. Pero antes que el señor Tompkins tuviera tiempo de preguntar qué ocurría, hubo una gran conmoción en el extremo derecho de la escena. De repente, una leona solitaria salió de algún escondite y entró en campo abierto. En cuanto las gacelas la vieron, el terror invadió y huyeron a toda carrera entrando por las dos brechas abiertas en la hilera de árboles.

Cuando salieron del otro lado sucedió algo muy extraño: en lugar de mantenerse unidas como manada o dispersarse en todas direcciones, el grupo se dividió en varias columnas separadas y cada columna *se lanzó directamente contra alguno de los grupos de leonas que aguardaban*. A su llegada a esos grupos, todas las gacelas kamikazes eran capturadas y devoradas.

El señor Tompkins estaba desconcertado.

–Eso no tiene sentido- exclamó.

–Claro que sí lo tiene – murmuró el profesor–. Con toda seguridad lo tiene. En en verdad fascinante: ¡la doble ranura de Young!

–¿La doble qué de quién? –preguntó intrigado el señor Tompkins.

–Oh, perdone. Me temo que ahora vienen más tecnicismos. La cuestión es que hay un experimento en el que un haz es disparado contra dos ranuras abiertas en una barrera. Si el haz está formado por partículas (como la pintura de una lata aplicada con un aspersor), podemos esperar que del otro lado salgan dos haces, uno por cada ranura. Pero si el haz está constituido por ondas, cada ranura actuará como una fuente de ondas y éstas se propagarán hacia el otro lado, sobreponiéndose entre sí. Las crestas y los valles de los dos conjuntos de ondas se mezclarán unos con otros y provocarán interferencias entre sí. En ciertas direcciones, los trenes de ondas pierden el paso y las crestas de uno coinciden con los valles del otro, de manera que ambos se cancelan y no pueden propagarse en esas direcciones. Eso se conoce como *interferencia destructiva*. Pero en otras direcciones ocurre lo contrario: los trenes de ondas llevan el mismo paso, de modo que las crestas de uno coinciden con las crestas del otro y también sus valles coinciden, se refuerzan entre sí y el resultado es que en cada una de esas direcciones se transmite una onda sumamente grande. Eso es lo que llamamos *interferencia constructiva*.

–¿Dice usted que al otro lado de las ranuras se forman haces separados que corresponden a los lugares donde existe interferencia constructiva, y no se obtiene nada en los lugares donde la interferencia es destructiva? – preguntó el señor Tompkins.

–Así es. Y el resultado no se reduce a sólo dos haces. Se puede obtener gran cantidad de ellos, todos separados entre sí por la misma distancia. El ángulo en que salen depende de la longitud de onda del haz inicial y de la separación que exista entre las dos ranuras. El hecho de que puedan obtenerse más de dos haces transmitidos demuestra que estamos tratando con ondas y no con partículas. Esto se conoce como “el experimento de doble ranura de Young” porque así fue como el físico Young logró demostrar que los haces de luz están formados por ondas. Ahora bien, en esta versión –dijo el profesor refiriéndose a la gran matanza que se estaba produciendo a sus pies– tenemos una demostración de que también estas gacelas se comportan como ondas.

Lo destacable de la forma de proceder de Gamow, además del uso de analogías y metáforas y en ocasiones la exposición de experimentos mentales, elementos que también encontramos en los otros textos divulgativos analizados, es que estos recursos se introducen en un relato de ficción, en el que se involucran personajes, se presenta una complicación y hay una resolución, lo que conforma una historia que posee drama, elemento que permite capturar y mantener la atención del lector.

En la siguiente sección analizaremos el papel que juegan las herramientas literarias, como las metáforas y analogías, así como los desafíos y riesgos que se presentan al utilizarlos en la divulgación de la física cuántica.

Más adelante observaremos cómo la narrativa en la divulgación puede considerarse un buen recurso para transmitir concepciones científicas y mantener la atención del público, condición de suma importancia para cualquier producto divulgativo, al considerar que el público resulta ser un público voluntario, al que, de acuerdo a Ana María Sánchez Mora (2010) se le tiene que seducir, no aterrorizarlo ni humillarlo.

4.2 Dificultades y desafíos para la representación divulgativa de la física cuántica

Dificultades con los recursos retóricos: analogías y metáforas

Después de haber observado la estructura de los textos de divulgación que elegimos, nos percatamos de que todos los autores comparten en mayor o menor medida, independientemente del estilo de su discurso, el uso de figuras retóricas como la metáfora y la analogía, las cuales acompañan a las descripciones y explicaciones. Estas figuras se pueden encontrar en la mayoría de los productos de divulgación sobre cualquier tema y podrían ser consideradas una característica esencial para la divulgación científica.

Tanto las metáforas como las analogías son recursos necesarios para cualquier divulgación, pues son recursos que están presentes en cualquier proceso de comunicación como un mecanismo fundamental para la capacidad de lenguaje y el pensamiento en los seres humanos. Ambos recursos cumplen con distintas funciones: asociar, evocar imágenes, crear representaciones mentales y estimular procesos cognitivos, sólo por mencionar algunas. Esas características han despertado el interés de distintas disciplinas para su análisis, por lo que podemos encontrar una gran cantidad de estudios dedicados a esos recursos, aunque la mayoría de las investigaciones se enfocan en la metáfora (Fahnestock, 1999; Gibbs, 2008). Las investigaciones dedicadas a este tema pueden surgir de la lingüística, literatura, psicología, neurociencias, educación e incluso de la filosofía de la ciencia, además de la divulgación científica.

Para concretar lo dicho hasta aquí, determinemos a qué nos referimos con cada uno de estos términos desde la divulgación de la ciencia. Dicho de manera breve, la analogía se refiere a una relación de semejanza entre objetos distintos y “opera mediante la evocación de una imagen asociada [...] *cuya* similitud expresa una relación cualitativa *entre los objetos*: «parecido a»; «semejante a»; «del mismo modo que»”. (Calvo, 2001; Sánchez, 2010). Para Douglas Hofstadter (2013), matemático y filósofo de la ciencia, el entendimiento de cualquier concepto se debe a la recreación por analogía, es decir, para dar sentido a un

concepto nuevo y desconocido se ha de recurrir a términos conocidos que muestran un vínculo con lo nuevo. Teniendo presente esto podemos advertir su funcionalidad para el discurso en la divulgación.

Por otro lado, el término metáfora consiste en un concepto que abarca a las analogías y símiles, el cual etimológicamente se refiere al traslado del sentido de una palabra o frase a otra; este significado lo podemos encontrar en Aristóteles, quien no limita el concepto a su mero significado etimológico. El filósofo griego consideraba a la metáfora como un recurso que facilita la persuasión, pero que también incita a la indagación y vuelve agradable el aprendizaje. (Aristóteles, 2013)

La esencia de la definición de metáfora que da Aristóteles es la que se retoma cuando se justifican las representaciones metafóricas en la divulgación científica (Cuevas, 2005). El uso de las metáforas en la divulgación se ha considerado una herramienta didáctica que pretende dar mayor claridad a la explicación de conceptos, apelando a sus efectos cognitivos y también a sus efectos persuasivos o retóricos, en el sentido de que a partir de ella se pretende un acercamiento con el público y mantener su atención. Sin embargo, es importante señalar que las funciones de esta herramienta discursiva no se limitan a las que hemos mencionado, sino que se le han conferido otras: “expresar actitud emocional, cultivar la intimidad, crear efectos humorísticos, argumentar por analogía, sostener alguna ideología, entre otras” (Muñoz, 2010). Tales funciones contribuyen a crear textos más cercanos y familiares para el lector no experto.

A pesar de ser esenciales y útiles para la divulgación, hay que tener presente que una mala metáfora o analogía podría desorientar u ocasionar interpretaciones erróneas de lo que se quiere transmitir. El mismo Aristóteles advertía que “el empleo exclusivo de tales términos resultará ora un enigma ora un barbarismo: un enigma, si se abusa de las metáforas, un barbarismo, si se apela a palabras extrañas”. (Aristóteles, 2013, 1458b)

Existen diversas teorías que analizan a la metáfora y que la caracterizan desde distintas perspectivas. Sobre estos análisis aquí sólo nos interesa cómo la construyen, por lo que solamente se adoptará una postura conocida como la corriente cognitiva, en la que se dice que la metáfora se constituye de dos elementos: foco y marco, también conocidos como vehículo y tenor. El foco o vehículo se refiere a las palabras o frases que se usan para dar el sentido figurado, mientras que el marco o tenor son aquellas palabras que refieren al término literal o término real. (Black, 1982; Richards, 1936)

Un ejemplo de lo anterior lo podemos ver en el momento en el que Einstein e Infeld caracterizan a los cuantos elementales de la materia como los átomos, en el sentido de que señalan al átomo como el elemento mínimo en el que se pudiera dividir una molécula, también hacen una equivalencia del cuanto con la moneda mínima que alguien podría llevar consigo. En el primer caso nos dicen: “En los procesos químicos, es el átomo, y no la molécula, el que desempeña el papel de cuanto elemental”, en el segundo refieren: “En España la moneda mínima o, como lo llamaremos, el «cuanto elemental» del dinero español, es «un céntimo». El cuanto elemental del dinero francés es «un céntimo»”. En estos ejemplos los términos que funcionan como foco o vehículo son «átomo» y un «céntimo».

Teniendo presente la estructura anterior, observamos que es en el foco o vehículo donde se emplea un vocabulario más común y es también donde surge el riesgo de la polisemia, así como la ambigüedad de los significados; situación que se trata de evitar en el discurso científico, pues en él se ha de procurar que el vocabulario sea unívoco con la pretensión de ser universal. Por otro lado, como lo menciona Calsamiglia (1997), el texto divulgativo al ser comunicado con un lenguaje común “se transforma en una entidad abierta y heterogénea, con la posibilidad de asociar su contenido con temas de la vida en general”, debido a que uno de los factores que influyen en la significación y comprensión de la metáfora es que el significado asignado por el público estará en función de su bagaje conceptual e incluso cultural.

Una de las dificultades al representar y describir los fenómenos cuánticos es que ellos se dan a una escala que no es compatible con nuestra experiencia directa: los fenómenos que ocurren a escala microscópica no tienen un equivalente a nuestra escala. En este sentido, las metáforas que se podrían crear para ilustrar lo que ocurre en el mundo subatómico estarían expresadas solamente en sentido figurado: no tienen un referente directo con los conceptos macroscópicos. Como lo menciona Elizabeth Leane (2007): las metáforas de la divulgación de la física cuántica son todo vehículo y no tenor, evidenciando con ello una dificultad para la divulgación de esta ciencia. A pesar de ello, como lo vimos con Gamow, no podríamos negar que una buena metáfora es capaz de crear imágenes y transmitir las ideas y conceptos de la física cuántica a quienes no están familiarizados con la disciplina.

Veamos otros ejemplos de metáforas y analogías que han sido expuestas en los textos que hemos tratado a lo largo de esta tesis. Nos enfocaremos en la presentación de los

conceptos de “continuidad” y “discontinuidad” con la intención de observar las formas que utilizan los autores.

En *El Universo misterioso*, James Jeans ilustró la discontinuidad equiparándola con el funcionamiento de un reloj de manecillas. Su exposición es la siguiente:

En su forma más temprana, la teoría de Planck apenas iba más allá de sugerir que el curso de la naturaleza procedía de pequeños saltos y sacudidas, como las manecillas de un reloj. Sin embargo, aunque no avanza continuamente, un reloj es puramente mecánico en su naturaleza última, y sigue la ley de la causalidad en forma absoluta. Einstein demostró en 1917 que la teoría fundada por Planck parecía, al menos a primera vista, implicar consecuencias mucho más revolucionarias que la mera discontinuidad. Parecía destronar la ley de la causalidad de la posición que hasta entonces había tenido como una guía del curso del mundo natural. La vieja ciencia había proclamado con confianza que la naturaleza solo podía seguir un camino, el camino trazado desde el principio hasta el fin por la cadena continua de causa y efecto. (James, 1930, p. 17)

Como podemos ver, en el momento en el que Jeans hace ver la diferencia entre los conceptos de continuidad y discontinuidad también muestra una supuesta transgresión a la idea de causalidad en la naturaleza.

Por otro lado, en *La evolución de la Física* de Einstein e Infeld se ilustra la diferencia entre los conceptos de continuidad y discontinuidad¹¹⁸ y lo relacionan con el concepto de “cuantos elementales”:

La producción de una mina de carbón puede variar de modo continuo; es decir, es posible aumentar o disminuir el total de carbón producido en cantidades arbitrariamente pequeñas. Pero el número de empleados puede sólo cambiar discontinuamente. No tiene, evidentemente, sentido decir: «desde ayer, el número de obreros ha aumentado en 3.78» [...] Se puede afirmar, entonces, que ciertas magnitudes cambian de una manera continua y otras discontinuamente, o sea, por cantidades que no se pueden reducir indefinidamente. Estos pasos indivisibles, mínimos, se llaman los *cuantos elementales* de la magnitud en cuestión”. (Einstein e Infeld, 1993, p. 200)

Si analizamos rápidamente ambas exposiciones, observamos que las metáforas y analogías utilizadas no solamente permiten aclarar las ideas o los conceptos al trasladar el significado a contextos más comunes, sino que las explicaciones donde están insertadas también son utilizadas para respaldar y desarrollar un argumento más amplio. Por un lado,

¹¹⁸ Otra metáfora que utilizaron los autores para mostrar la diferencia entre estos dos conceptos fue la de mostrar la diferencia entre los caminos marcados en un mapa; caminos de la trayectoria de un tren, la cual se divide en función de las estaciones y los caminos que se pueden recorrer en un auto, los cuales no son caminos segmentados. Cfr. Sección dedicada a *La evolución de la física* en 2.1: Representación del comportamiento dual de los componentes mínimos de la materia en la física cuántica a través de textos divulgativos.

Jeans utiliza la explicación de “continuidad y discontinuidad” para desarrollar su idea de una violación a la causalidad en la naturaleza, y con ello dar paso a otro tipo de ideas, como el de “libre albedrío”. Por su parte, Einstein e Infeld hablan de estos conceptos para después abordar la idea de “cuantos elementales”.

Este tipo de proceder también lo podemos observar en las publicaciones que han sido catalogadas como “divulgación de la física cuántica” pero que, en su contenido, presentan argumentos que buscan relacionar los conceptos e ideas propias de la teoría con creencias esotéricas. A este tipo de texto lo hemos nombrado “divulgación pseudocientífica”, y lo hemos analizado en el tercer capítulo del presente trabajo. Argumentos de este estilo los encontramos en los libros *La danza de los maestros de Wu Li* (1979) y *El Tao de la Física* (1975), de Gary Zukav y Fritjof Capra, respectivamente.

Los argumentos presentados por Zukav y Capra tienen una tendencia similar a la que expresa James Jeans, pues en sus publicaciones no solamente se representa la física cuántica como el final de la física newtoniana, sino que también manifiestan el fin del determinismo y la causalidad. En el contenido de estos textos también encontramos el uso de metáforas, en particular metáforas antropocéntricas o personificadas.

Antes de pasar a mostrar este tipo de metáforas y las implicaciones que conllevan, veamos cómo Gary Zukav representa la idea de discontinuidad:

¿Qué era lo que había descubierto Planck que le causaba tan profunda inquietud? Que la estructura básica de la naturaleza es granular o, como les gusta decir a los físicos, «discontinua». ¿Qué se quiere expresar con «discontinua»? Si tomamos la población de una ciudad es evidente que sólo puede fluctuar en un número completo de gente. Lo máximo que la población de una ciudad puede aumentar o disminuir es en una persona. No puede aumentar en 0,7 personas. Puede aumentar o disminuir en 15 personas, pero no en 15,7 personas. En el dialecto de la física, una población puede cambiar solamente en discretos incrementos o discontinuamente. Sólo podemos hacer que sea mayor o más pequeña a saltos y el más pequeño de los saltos tiene que ser una persona completa. En general, esto es lo que descubrió Planck sobre el proceder de la naturaleza. (Zukav, 1999)

La forma en que Zukav presenta la idea de discontinuidad es muy similar a la metáfora que emplearon Einstein e Infeld en *La evolución de la Física*, y podemos afirmar también que logra generar una “imagen” del concepto que facilita su comprensión. Sin embargo, la metáfora desarrollada por Zukav se encuentra dentro de un argumento más amplio en el que se busca vincular la idea de conciencia con el mundo subatómico. Para el autor “la objetividad no existe” en la mecánica cuántica, dado que “somos parte de la naturaleza y cuando estudiamos la naturaleza, no puede eludirse el hecho de que es la naturaleza la que

se está estudiando a sí misma". Sobre esa idea, Zukav trata de hacer el vínculo entre el concepto de conciencia y la teoría. Para Zukav, esta y otras ideas se pueden justificar a partir del psicoanálisis. En este sentido, en su obra se pueden observar argumentos similares, en los que se presentan ideas y conceptos propios de la física cuántica pero que están envueltos en argumentos que quedan fuera de la teoría. Ejemplo de ello son conclusiones como la siguiente:

La implicación filosófica de la mecánica cuántica es que todas las cosas en nuestro universo (incluso nosotros), que parecen existir independientemente, son en realidad partes de un modelo orgánico que lo abarca todo. Y que no hay ninguna parte de ese modelo, de ese todo, que esté verdaderamente aparte de él o de las demás partes. (Zukav, 1999, p. 61)

Aquí es importante volver hacer la advertencia de las extrapolaciones injustificadas que se hacen a partir de lo estipulado en la física cuántica, una situación en la que la divulgación de la ciencia tiene un desafío que hay que enfrentar, y en el que se tiene que tomar en cuenta a los públicos que están propensos a aceptar sin sospecha este tipo de argumentos.

En el momento en el que hemos indicado que el proceder de Zukav es similar al que se observa en el texto de James Jeans o en el de Einstein e Infeld, solamente queremos señalar que la exposición de ciertos conceptos de la teoría cuántica está dentro de un argumento más amplio. Sin embargo, es en el argumento general donde se distinguen las variaciones, las cuales responden a los objetivos de cada autor. Como hemos visto, Zukav presenta los conceptos de continuidad y discontinuidad y los conecta con ideas que tienen que ver con el psicoanálisis y la conciencia, temas que no tienen ninguna relación con el campo de estudio de la física cuántica.

Es importante advertir al divulgador que no tiene una formación en el área y que pretenda hacer divulgación de la física cuántica que debe cuidarse de este tipo de encadenamiento de ideas para no reproducirlas. Algo que puede evitar caer en esas extrapolaciones sería el tener presente el proceso por el que pasa el conocimiento científico, el cual conlleva que las conclusiones presentadas puedan ser verificadas, i.e., sean ideas que permitan ser evidenciadas y comprobadas. Con esta advertencia se esperaría que el producto de divulgación no caiga en extrapolaciones o descripciones de ideas o fenómenos que no logran comprobarse. En este sentido, también es importante que parte de la tarea de la divulgación sea advertir al público que existen discursos que

pretenden dar cuenta de fenómenos místicos o sobrenaturales a partir de la teoría, pero tales fenómenos no cuentan con una explicación científica, puesto que todo lo que ésta explica necesita corroboración, situación que no sucede con ese tipo de “fenómenos”. La advertencia sobre este tipo de trabajos me parece que también es un deber en el trabajo de divulgación.

Ahora bien, volvamos al tema del uso de metáforas en la divulgación de la cuántica, en la que es común encontrar metáforas que personifican a los objetos; a este tipo de metáforas también se les conoce como prosopopeyas. Es decir, figuras retóricas que les atribuyen a los objetos inanimados o abstractos características o acciones como si fuesen personas. Un ejemplo claro se presenta en los cuentos del Señor Tompkins de George Gamow; ahí, el personaje principal interactúa en un mundo en el que se perciben los fenómenos de los sistemas subatómicos. En *El carácter de la ley física* de Feynman se dice que “los electrones se comportan justo igual que los fotones: ambos están *chiflados*, pero de la misma manera”. Y en relación con el experimento de la doble rendija nos dice:

[...] el futuro es impredecible. Es imposible predecir, a partir de cualquier información previa, por qué agujero pasará o lo veremos pasar. Esto significa que, en cierto sentido, *la física ha tirado la toalla*, si es que su propósito original era (y todo el mundo lo creía así) saber lo suficiente para, dadas unas circunstancias, poder predecir lo que ocurriría a continuación [...] «Ni siquiera la propia naturaleza *sabe* qué camino va a *escoger* el electrón». (Feynman, 2005, p. 160)

Atribuirle al electrón la capacidad de elegir resulta un poco problemático porque de alguna manera se contradice uno de los supuestos de la teoría cuántica, en el que se indica que el comportamiento de las partículas subatómicas, como objetos individuales, es totalmente aleatorio. Por otro lado, el uso de este tipo de metáforas, en las que de alguna manera se le otorga un sentido de voluntad a las partículas, podría provocar una serie de interpretaciones equívocas; pues este tipo de metáforas encajan bien con los paralelismos entre el misticismo y la física cuántica que algunos autores buscan mostrar en sus textos de divulgación. (Brandon, 2013)

Sin embargo, cabe señalar que en la exposición de Feynman no da cabida a generar otras interpretaciones, pues sus metáforas están bien acotadas a la idea que se quiere comunicar. Podemos encontrar otros ejemplos del buen uso de metáforas personificadas o prosopopeyas, pero también existen casos en donde este tipo de caracterización genera dificultades en su interpretación, provocando sentidos erróneos en el público.

Un ejemplo de ello se da en la exposición de Zukav, quien dice que las partículas son “orgánicas” y que, desde su perspectiva, son como un “ser vivo con conciencia”. Al momento en el que el autor habla de una intervención en los resultados experimentales entre el observador y su conciencia, en donde están involucradas las “partículas orgánicas”, se genera una mezcla de significados que provocan una interpretación errónea de la física cuántica, aunque es la que el propio autor busca generar. En este sentido, las metáforas utilizadas por Zukav están enredadas en un argumento retórico que va más allá de los alcances de la teoría, y esto no quiere decir que el autor logre un análisis superior al que ofrece la teoría, sino que ha de tomar concepciones que favorecen a una interpretación muy particular que no tiene justificación teórica ni evidencia empírica.

A pesar de las interpretaciones inestables que se pudieran ocasionar con este tipo de metáforas, no podemos descartar su función pedagógica para generar una mejor comprensión de conceptos e ideas. Se debe cuidar que la aplicación de estas metáforas esté bien delimitada y no permita la extrapolación de su significado. Es el contexto, el argumento más amplio en el que está incrustada la metáfora, lo que determinará el rango de posibles interpretaciones. Asimismo, sería muy útil preguntarse en qué medida este tipo de metáforas exceden su función de sólo evidenciar ciertas características, y cuál es el efecto que podrían provocar en su comprensión sobre la física cuántica. (Leane, 2007)

Para lograr una metáfora adecuada que cumpla con al menos las dos funciones que resultan necesarias para la divulgación, esto es, mejorar las explicaciones de ideas o conceptos abstractos y, a la vez, alcanzar un acercamiento con el público, Goatly (1997, p. 135), investigador sobre el lenguaje, indica que se deben tomar en cuenta tres factores: el conocimiento del idioma, el conocimiento del contexto y el conocimiento del entorno situacional y sociocultural del público. Como hemos mencionado líneas atrás, el significado que se le otorgue a lo que se está comunicando a través de la metáfora está en función del contexto en el que está adherida la metáfora, y también dependerá, en cierto grado, del bagaje conceptual con el que cuenta el lector, condición que implica el análisis del entorno del público al que se quisiera dirigir el producto de divulgación.

Por último, es importante reiterar que el uso de metáforas y analogías es crucial al momento en el que el público percibe la idea o concepto, situación que aumenta la relevancia de que su aplicación sea analizada con cuidado por los divulgadores que busquen representar cualquier concepto o idea. Una opción para lograr un buen análisis de estos

recursos sería consultar a los expertos de la disciplina para evaluar el alcance del discurso divulgativo, así como distinguir aquello que se oculta en este tipo de recursos.

Dificultades heredadas desde los fundamentos de la teoría

El comunicador de la ciencia o el divulgador no sólo se enfrenta al desafío de crear estos elementos retóricos de manera creativa y eficiente, los cuales deberán permitir al público generar un entendimiento correcto de algún concepto o idea. Una de las dificultades que arrastra la divulgación de la física cuántica reside en que los conceptos que son aplicados en el mundo a nuestra escala no son en absoluto fieles a lo que sucede en el mundo subatómico. Ello provoca, en cierto sentido, un conflicto para exponer o representar a los fenómenos atómicos sin que exista el riesgo de que el significado se desvíe.

Desde otra perspectiva, quien busca divulgar la física cuántica también se enfrenta a un problema más fundamental: comprender cabalmente las propias dificultades que encontramos en las bases teóricas de la física cuántica.

En la física cuántica hay una problemática intrínseca relacionada con la imagen del mundo que se representa a partir de la teoría, esto es, con la interpretación de esta. Como se ha mencionado a lo largo de la tesis, no hay un consenso general sobre la interpretación; aunque la interpretación dada por la Escuela de Copenhague sea la más difundida, en ella se presentan debilidades y críticas por parte de quienes buscan una interpretación con mayor consistencia y coherencia. A pesar de esta necesidad, el interés por la investigación relacionada con la interpretación se reduce al grupo de físicos que están dedicados a estudiar sus fundamentos; los demás físicos optan por una postura instrumentalista, es decir, enfocarse en las predicciones y resultados que la teoría ofrece, sin preocuparse por abordar de manera más profunda lo relacionado al significado de ésta, puesto que al hacerlo no representaría consecuencias inmediatas a las predicciones de los experimentos. Para el físico Dennis Dieks (1996), esta actitud se reproduce en la mayoría de los físicos y son algunos pocos los que se preocupan por comprender la naturaleza de la física cuántica.

La falta de interés por abordar la naturaleza que subyace a la teoría cuántica se refleja, en un primer momento, en la cantidad de trabajos e investigaciones en esta área y, en segundo lugar, también en los productos de divulgación, puesto que los autores de la mayoría de éstos se centran en presentar las características llamativas de la teoría que se

evidencian a partir de los resultados experimentales, pero pocas veces se muestran argumentos amplios respecto a las preguntas e implicaciones que están tras de ellos.

Por otro lado, tanto Dieks (1996) como Adán Sus (2017) nos hacen ver que en la divulgación de la física cuántica la falta de consenso sobre una interpretación única que sea respaldada por toda la comunidad de físicos, se traduce en una dificultad por transmitir la teoría de la manera más clara posible, en ocasiones presentando imprecisiones y representaciones que comprometen interpretaciones que caen fuera del alcance teórico.

Considerando lo anterior, reiteramos que el tipo de divulgación que se busca promover en esta tesis es aquella en la que se aborden los debates o preguntas que subyacen en la teoría cuántica, la cual no solamente tendría que estar dirigida a un público externo al círculo de físicos, sino que también tendría que contemplar a los propios físicos que pudieran estar interesados pero que no se han involucrado en las discusiones que se presentan en los fundamentos de la física cuántica.

En la siguiente sección se presentará cómo la narrativa actúa como una herramienta para la divulgación con la que se puede cumplir con el binomio de rigor-amenidad que López Beltrán (1985) propone para la divulgación científica. En la presente exposición se evaluará este recurso para lograr el tipo de divulgación que se ha promovido en la presente tesis.

4.3

La narrativa como un recurso para la divulgación de la ciencia

Cualidades y limitantes del discurso narrativo

Lo primero y más importante en esta sección es definir el concepto de “narrativa” y el uso que le daremos de aquí en adelante. Después de ello presentaremos algunos argumentos que han respaldado la idea de considerar la narrativa como un buen recurso para la divulgación. Cabe advertir que aquí solamente se tomará una de las concepciones, debido a que en el área de la narratología, el estudio dedicado a reflexionar y analizar la estructura de la propia narración o relato, se presentan discusiones profundas alrededor del concepto.

El estudio de la narrativa se puede rastrear desde Aristóteles, quien en su obra *Poética* nos habla de la estructura de las narraciones. Él busca dar cuenta del porqué las historias tienen la capacidad de atraer a las personas y por qué las historias perduran. Para el filósofo griego el contar historias consistía en una técnica del hombre, por lo que no se trataba de algo que el hombre tuviera por naturaleza. Identificó tres momentos esenciales para toda narrativa: el primero de ellos se refiere al personaje o héroe de la historia que busca un objetivo, para alcanzar dicho objetivo este personaje atraviesa una serie de eventos en los que se enfrenta a algún conflicto o dificultad, esto último representa el segundo momento que Aristóteles identificó; por último, el tercero consiste en haber superado la dificultad y alcanzar el objetivo, aunque pudiera ser que no se haya alcanzado lo pretendido. Con estos tres momentos la narrativa se conformaría por el planteamiento, nudo y desenlace.

La teoría de Aristóteles, esbozada a grandes rasgos, se ha ido reformulando con el paso del tiempo. El antropólogo y lingüista ruso Vladimir Propp analizó la estructura de los cuentos rusos en su texto *Morfología del cuento*. Él señaló que todos los cuentos fantásticos comparten una misma estructura. Indica que todo cuento parte de una situación inicial y después de la situación inicial vienen las funciones; esto es, las acciones relevantes que son llevadas a cabo por los personajes del relato. Propp identifica 31 funciones¹¹⁹.

Como podemos ver, el esquema de 31 funciones propuesto por Propp surge de un género de narrativa muy específico, el de la narrativa de ficción. A pesar de ello, las funciones que identifica Propp pueden ser clasificadas en el esquema de tres partes establecido por el filósofo griego, esquema básico que podría ser aplicado para cualquier relato, de ficción o no.

Por otra parte, en la historiografía la narrativa se entiende como una forma discursiva o recurso retórico para la representación de acontecimientos y procesos históricos. De acuerdo con el historiador y filósofo Hayde White (1994, p. 11), este tipo de discurso no puede considerarse neutro pues en él están implícitas aspectos epistemológicos, ideológicos y hasta políticos.

¹¹⁹ Las funciones que Propp (2015) distinguió después de una situación inicial en el cuento son las siguientes: ausencia, prohibición, transgresión, información, engaño, complicidad involuntaria, daño o carencia, mediación, decisión del héroe, partida, primera función del donante, reacción del héroe, obtención del auxiliar mágico, traslado de un reino a otro, lucha, marca, victoria, eliminación, regreso, persecución, salvación, llegada de incognito, impostura del falso héroe, tarea difícil, cumplimiento, identificación, descubrimiento, transfiguración, castigo y nupcias. Es importante rescatar que en el diseño del relato no se recomienda utilizar todas las funciones, sino elegir las que mayor convengan a la historia por contar.

Una crítica que surge de la narrativa en la historia es que nunca se podrá representar fielmente lo real, dado que la verdad de un relato histórico, en la historiografía tradicional, consiste en la correspondencia y coherencia de la narración, diseñada por el historiador, con el relato vivido por los personajes del pasado. A diferencia de la narrativa de ficción, en donde todo el relato es inventado, en la historia el historiador solo inventa “adornos retóricos o efectos poéticos” con la intención de captar y mantener la atención de los lectores.

Desde otra perspectiva, desde un enfoque psicológico, se examina la representación narrativa en los sujetos, se dice que en el proceso narrativo personal está involucrado el sentido de identidad de la persona y la memoria. Desde la postura de la *narrativa del yo* o *narrative self* se dice que la idea del “yo” se construye a partir de las narraciones se creamos sobre nuestras vidas. Esto dicho muy brevemente dado que no lo desarrollaremos para no desviarnos de nuestros propósitos.

Las anteriores referencias nos permiten observar que la narrativa se trata de un tema que se ha analizado desde diversos enfoques y diversas disciplinas, el análisis va desde su estructura o forma hasta su contenido. Las diferentes investigaciones buscan dar cuenta del papel que juega este acto para la sociedad, pues el hecho de narrar se trata de un acto que ha estado presente desde los primeros grupos sociales, quienes se reunían para contar historias. En la actualidad dicha actividad se siguen presentando, aunque las formas de comunicación se han transformado, pues además de una comunicación oral, como la de los antepasados, existen distintos medios para contar historias.

Para Jonathan Gottschall (2012), investigador de literatura y evolución, la especie de los seres humanos podría denominarse *Homo fictus* (hombre de ficción), por ser un simio con una mente narradora, en donde las historias o relatos están siempre presentes: “somos adictos a las historias aun cuando estamos dormidos”, menciona el investigador. De acuerdo con esto, la capacidad de contar, percibir y comprender historias es un elemento distintivo de la especie humana que está vinculado con su capacidad de lenguaje.

Para los propósitos de la tesis delimitamos el concepto de narrativa como el acto de contar una historia que pudiera ser de ficción o no; las historias siguen una estructura particular que describe relaciones de causa y efecto entre los eventos que acontecen en un periodo de tiempo, y dichos eventos afectan a los personajes. Esta definición es independiente del contenido que se desarrolla en la historia o relato y se enfoca más bien

en la forma; en este sentido, una estructura narrativa puede estar presente en casi cualquier actividad de comunicación (Abbot, 2002; Dahlstrom, 2014).

Cuando hablamos de narrativa como un recurso o herramienta en la divulgación de la ciencia encontramos varios puntos de vista con respecto a su utilidad; hay quienes apuestan por el uso de la narrativa como un recurso para mantener el interés del público y, si es posible, entusiasmar al lector a partir de la construcción de algún relato de misterio, drama o aventura en el que se aborde cualquier tema científico que se desee divulgar (López Beltrán, 1985). Por otro lado, hay quienes dicen que este recurso no sólo cumple con la función de mantener el interés del lector, sino que también contribuye al entendimiento de lo que se quiere comunicar.

Sobre esto último se han realizado diversos estudios que surgen desde diversas disciplinas, como la psicología, educación, las neurociencias, biología evolutiva, estudios en literatura y de la filosofía de la literatura, entre otras. Todas ellas han analizado la relación entre el contenido narrativo y el aprendizaje. Desde la psicología se ha afirmado que los relatos de ficción pueden provocar, por un lado, una cierta empatía en el lector a través de los personajes de la historia, pues al adentrarse en el trama que se está contando se crea una especie de identificación o imitación de lo que sucede en ella; de modo que la narrativa funciona como vehículo para transmitir al lector ciertos estados de los personajes involucrados, y a la vez lograr una comprensión sobre las circunstancias o contextos reproducidos en el relato (Oatley, 2008). Desde las neurociencias se ha investigado cómo las narrativas influyen en la memoria y comprensión, ambos factores considerados para evaluar el proceso de aprendizaje, y con ello, evaluar qué tan exitosa es la comunicación de la información. (Negrete, 2008)

Afirmaciones similares se han manifestado desde la filosofía de la literatura, disciplina desde la cual también se cuestionan algunos conceptos de la propia literatura y de la narrativa. Peter Lamarque (2014) y Mitchell Green (2006), quienes han desarrollado sus investigaciones alrededor de esa rama de la filosofía, así como de la filosofía del lenguaje y la filosofía de la mente, han afirmado que las obras literarias, como elementos narrativos, pueden ser fuente de conocimiento. Para Green el conocimiento estará en función de dos condiciones: la primera, que el conocimiento debe estar impulsado por la imaginación; la segunda, que en el ejercicio imaginativo se debe cambiar o poner en juego una creencia o conjunto de creencias.

De acuerdo con lo anterior, es posible señalar, desde una perspectiva muy amplia, que las narraciones ofrecen aumentar el interés de lo que se comunica, así como promover la facilidad de comprensión y memoria por parte del receptor; además, pueden resultar una herramienta para persuadir, como se advertía desde Aristóteles.

Con todas esas propiedades, es fácil aceptar que esta herramienta pudiese resultar interesante y útil al aplicarla en la comunicación o divulgación de la ciencia, en la que a partir de contar una historia o relato se busque recrear el proceder de la ciencia y transmitir el conocimiento científico. No obstante, a pesar de las cualidades que se le otorgan a la narrativa, es importante señalar que son pocas las investigaciones que han examinado la eficiencia del estilo narrativo en el contexto de la divulgación de la ciencia: “los contados estudios han producido resultados contradictorios en cuanto a lo que se gana epistémicamente. Algunos encuentran que el uso de la narrativa no hace más creíbles los contenidos ni se gana interés, precisión, amenidad o credibilidad” (Sánchez Mora, 2014). Por otro lado, también se han llegado a conclusiones totalmente divergentes, pues se afirma que “el estilo narrativo se percibe más atractivo, y que la cantidad de información retenida por el lector a partir de un recurso narrativo es mayor”, esto en comparación con textos escolares tradicionales. (Negrete, 2008)

A pesar de la falta de más investigaciones dedicadas a evaluar los efectos de la narrativa en la divulgación científica, se tienen los estudios y análisis que se han realizado desde la neurociencia, la psicología y la educación en ciencias para evaluar los efectos de los recursos narrativos en la memoria y la comprensión en el campo educativo. Estas investigaciones pueden funcionar como sustento para alentar el uso de la narrativa para propósitos de divulgación (Negrete & Lartigue, 2004; Wolfe & Mienko, 2007; Clough, M., 2011), en el sentido de que en la divulgación además de mantener la atención del público, también se busca que lo que se está exponiendo sea comprensible. Observemos las características propias de la narrativa en la divulgación y sus alcances, así como también las limitantes a las que se enfrenta este tipo de divulgación.

A diferencia del tipo de comunicación del conocimiento que se da entre los grupos de especialistas de cualquier ciencia –la cual se caracteriza por el uso de un lenguaje técnico, con la intención de que el significado sea lo más unívoco posible, así como una exposición en la que muchas veces el contexto se oculta o se sobreentiende, dado que el público pertenece a un colectivo que trabaja los mismos temas–, en un relato o narrativa hay una dependencia con la descripción de un contexto: su significado obedece a las relaciones de

causa y efecto de los eventos que se relatan. Por otro lado, en la información científica presentada entre los especialistas se sigue del razonamiento deductivo (la conclusión se sigue necesariamente de las premisas), mientras que en la narrativa el razonamiento que se sigue es inductivo (a partir de premisas particulares se obtienen conclusiones generales). En contraste con las afirmaciones precisas que se presentan en los reportes de los científicos, en los cuales se busca exponer resultados verdaderos, en la narrativa lo que se busca es que las situaciones expuestas y la información cumpla con la característica de verosimilitud (Dahlstrom, 2014).¹²⁰

A pesar de las diferencias expuestas entre la comunicación tradicional en la ciencia especializada y la comunicación basada en una narrativa dirigida a un público amplio – difusión y divulgación respectivamente– es posible destacar un punto de encuentro entre la estructura de la narrativa y la estructura que encontramos en la investigación científica: en las explicaciones científicas podemos encontrar protagonistas y conflictos, elementos necesarios para crear una historia. En este sentido, los protagonistas podrían ser los propios científicos que estudian algún elemento de la naturaleza, o bien, el papel protagónico lo podrían tomar los elementos de la naturaleza o fenómenos. De la misma manera, para Negrete (2004) los protagonistas también podrían ser las ideas e hipótesis. Ambos tipos de protagonistas, los científicos, fenómenos o ideas, podrían conducirse en una secuencia de eventos y al final llegar a un resultado u objetivo. Los conflictos aparecerían cuando hay diversas ideas que compiten para dar cuenta de los fenómenos, o cuando se presentan complicaciones para dar alguna explicación a los fenómenos. Si consideramos estas condiciones, es posible observar que en la historia de la física cuántica encontramos estos elementos (personajes y conflictos), por lo que considerar su divulgación a partir de un relato podría resultar pertinente.

En la búsqueda de una divulgación que nos presente los debates intrínsecos que hay en la física cuántica, por ejemplo, presentar las diversas interpretaciones dadas a la teoría, parecería apropiado crear una narrativa en la que se expongan los conflictos entre las diferentes posturas de los personajes involucrados, y así mostrar al lector la variedad de argumentos para dar cuenta de la teoría. Es importante señalar que se debería acentuar el

¹²⁰ Hay que señalar que, para la narrativa fantástica, subgénero de la narrativa de ficción, la verosimilitud no es un elemento característico. Este tipo de relato se desarrolla en un contexto en el que suceden hechos extraños, inexplicables o imposibles, pues no tienen referencia con la realidad, a los cuales el autor no pretende dar una explicación de ellos (James, E. & Mendlesonn, F., 2012).

conflicto entre las diferentes ideas y no en los físicos, con el propósito de mostrar las diferencias entre argumentos y no de personalidades. Considerando lo anterior, parecería sencilla la tarea de crear una trama entre las distintas posturas que surgen cuando se busca una interpretación de la teoría; sin embargo, con este tipo de narrativa se presentarían algunas dificultades, en el sentido de cómo los lectores acogerán la información, pues se les estarían presentando diversas opciones de interpretación, y así, la problemática recaería en cómo mostrar la información de manera neutral.

Uno de los desafíos de la divulgación a través de la narrativa es que las historias deberán mezclar muy bien dos tipos de discurso: el discurso de la trama de una historia, de ficción o no, y el discurso científico. El desafío consiste en que no es posible tener una receta que nos proporcione la medida exacta sobre la cantidad de ficción a incorporar, y con ello habría que cuidar no cruzar un límite muy fino entre el género de divulgación y ciencia ficción, pues este último busca otros propósitos que la divulgación. La ciencia ficción está basada en lo científicamente posible pero poco probable (James, E. & Mendlresonn, F., 2012), su objetivo no es que el lector comprenda los conceptos científicos, sino que solamente utiliza lo establecido por la ciencia para desarrollar un relato.

Como lo menciona Randy Olson (2015) si no se tiene un equilibrio con la cantidad de ficción, donde la proporción del contenido de ficción es mayor, podría resultar que el contenido se vuelva confuso, ya que el lector podría no alcanzar a percibir el rigor científico que se quisiera comunicar o bien, no distinguiría lo que pertenece a la ciencia y lo ficticio; mientras que, si se abusa del contenido de ciencia, como si fuera un tratado, es muy probable que se pierda el interés y comprensión por parte del lector, perdiendo así uno de los propósitos de hacer uso de la narrativa.

Sería ideal que en el discurso narrativo no se detecten los cambios o divergencias entre el discurso de ficción y el discurso de la ciencia. Es común encontrar textos de divulgación donde el autor introduce en la historia o trama las participaciones de expertos a través de alguno de los personajes; que en muchas ocasiones se trata de un experto que introduce el discurso científico con explicaciones y descripciones dirigidas a otro personaje que no es experto.

Con esa estructura narrativa se estaría evocando al modelo de déficit al tener a dos tipos de personajes: el experto y el aprendiz, en el que se genera prácticamente una comunicación lineal donde el experto educa al personaje lego, y de vez en cuando este último demanda explicaciones o retroalimenta su aprendizaje. Sobre esto hay que tener

cuidado: es necesario recordar que el público o lector no es una tabula rasa que sólo espera que se le provea de información; si se tienen este tipo de caracterizaciones es probable que el público se identifique como el personaje lego. Estructuras semejantes las podemos observar, por ejemplo, en los cuentos de George Gamow (2009), la cual ha sido replicada, aunque con algunas variaciones, por otros autores como Russell Stannard (1998) y Chad Orzel (2010). En las historias que desarrollan estos autores existe un experto en física, por lo regular un profesor, quien le explica a otro personaje interesado en el tema. Lo criticable en estas estructuras es que aparentemente no se toma en cuenta al público o lector, en el sentido de que puede verse reflejado en el personaje inculto.

Para finalizar esta sección, hay que tener presente que independientemente de los niveles de retención de información que se logra con la presentación basada en un esquema narrativo, puesto que aún falta mayor investigación al respecto, es indudable que el contenido resulta más atractivo en comparación con una exposición de ciencia tradicional, caracterizada por una exposición basada en descripciones y explicaciones. De acuerdo con esto, el uso de la narrativa cumpliría con una parte del binomio rigor-amenidad que se busca en la divulgación de la ciencia.

Como se ha señalado líneas atrás, una de las preguntas que podría surgir sería: ¿cuál es el límite de profundidad para el contenido científico? Aunque no hay una respuesta concreta, sí se pueden suponer esos límites a partir de los objetivos que se proponga el divulgador, así como del público al que esté dirigido el producto de divulgación. En resumen, de manera concreta, para lograr este tipo de divulgación se tendrá que cuidar la balanza rigor-amenidad.

4.4

Estrategia para divulgar los debates fundamentales de la física cuántica

En esta última sección proponemos una estrategia para lograr un producto de divulgación sobre física cuántica que permita al público, en un primer momento, distinguir las discusiones que surgen en los fundamentos de la teoría y, con ello, promover una actitud reflexiva sobre el proceder de la ciencia. Entenderemos el término “estrategia” como la planeación de un conjunto de actividades destinadas a conseguir un objetivo.

Para llegar a nuestro objetivo, que lo hemos escrito brevemente, retomaremos el análisis hecho a diversos elementos de las publicaciones de divulgación seleccionadas en la presente tesis. Esos elementos son:

- Objetivos que plantean los autores para exponer la física cuántica a un público no especializado.
- Conceptos e ideas que los autores exponen al lector.
- Postura del autor desde la cual aborda la teoría y desarrolla el contenido.
- Autor como figura de autoridad.
- Estructuras del lenguaje utilizadas para motivar el entendimiento de las ideas.
- Inconvenientes que conlleva la divulgación de fenómenos y explicaciones a los que no estamos acostumbrados en la vida cotidiana.
- Dificultades relacionadas a la transmisión de información errónea o pseudocientífica.

A lo largo de la tesis hemos observado que para llevar a cabo la tarea de divulgación se requieren habilidades para manejar el lenguaje: se tiene que crear una especie de balanza entre el lenguaje propio de la ciencia y el lenguaje común, lo cual no es una tarea sencilla. El asunto consiste, esencialmente, en trasladar el lenguaje propio de los especialistas científicos a un lenguaje más amplio, es decir, a un lenguaje natural que pueda ser percibido y comprendido por quienes no pertenecen a esas esferas, aunque no se espera que el público se vuelva experto. En este sentido, es válido y recomendable el uso de figuras

retóricas en el discurso para crear aproximaciones que permitan al público alcanzar cierto nivel de comprensión, a diferencia del discurso científico, en el que se busca que el lenguaje sea preciso y unívoco para evitar la polisemia. En última instancia la conexión que se logre con el público será a través del lenguaje, no obstante, no es suficiente hacer un buen uso del lenguaje comunicativo, pues atrás de él se encuentra un trabajo más profundo que toma en cuenta otros factores que nos proporcionarán mayores herramientas para entretejer el tipo de divulgación que proponemos.

En la presente sección distinguimos algunos aspectos que consideramos esenciales y que se deberán tomar en cuenta al momento de diseñar el discurso de divulgación de la física cuántica en el sentido que hemos sugerido, es decir, en la que la exposición se cubran las diversas aristas de esta ciencia y muestre una imagen más amplia de ella.

Es verdad que no hay recetas específicas para lograr una divulgación que sea considerada “buena divulgación”, en el sentido de que sea clara, amena, accesible y fiel al contenido científico, sin embargo, creemos que se puede tener un equilibrio en el binomio rigor-amenidad, como lo ha planteado López Beltrán (1985), al tener en cuenta ciertos supuestos y advertencias. Describiremos esos supuestos como componentes básicos y, a la vez, sugerimos algunos factores a considerar, señalando también algunas advertencias.

La estrategia que trazamos se sustenta en cuatro elementos esenciales que funcionarán como soporte para la producción del producto de divulgación, estos son: reconocer la divulgación científica como cultura científica, reconocer el rol de la filosofía e historia de la ciencia en la formación del divulgador, contar con el conocimiento científico necesario para no perder el rigor científico y, por supuesto, contar con habilidades de comunicación, en esta última competencia proponemos acoger la narrativa como herramienta para la divulgación científica.

A lo largo de la tesis se ha hablado de estos temas, pero aquí los reuniremos como piezas esenciales de la estrategia que proponemos. Cada uno de los elementos implican ciertos temas que permitirán al divulgador tener una formación más integral que le permitan crear el tipo de divulgación propuesto. Quizá para quienes están familiarizados o involucrados en la divulgación científica algunos de los elementos señalados les resultarán evidentes, pero es necesario hacer referencia a ellos pues omitir o suponer alguno podría comprometer el objetivo que planteamos.

En el siguiente esquema podemos visualizar una representación de la estructura a seguir para el tipo de divulgación que proponemos.

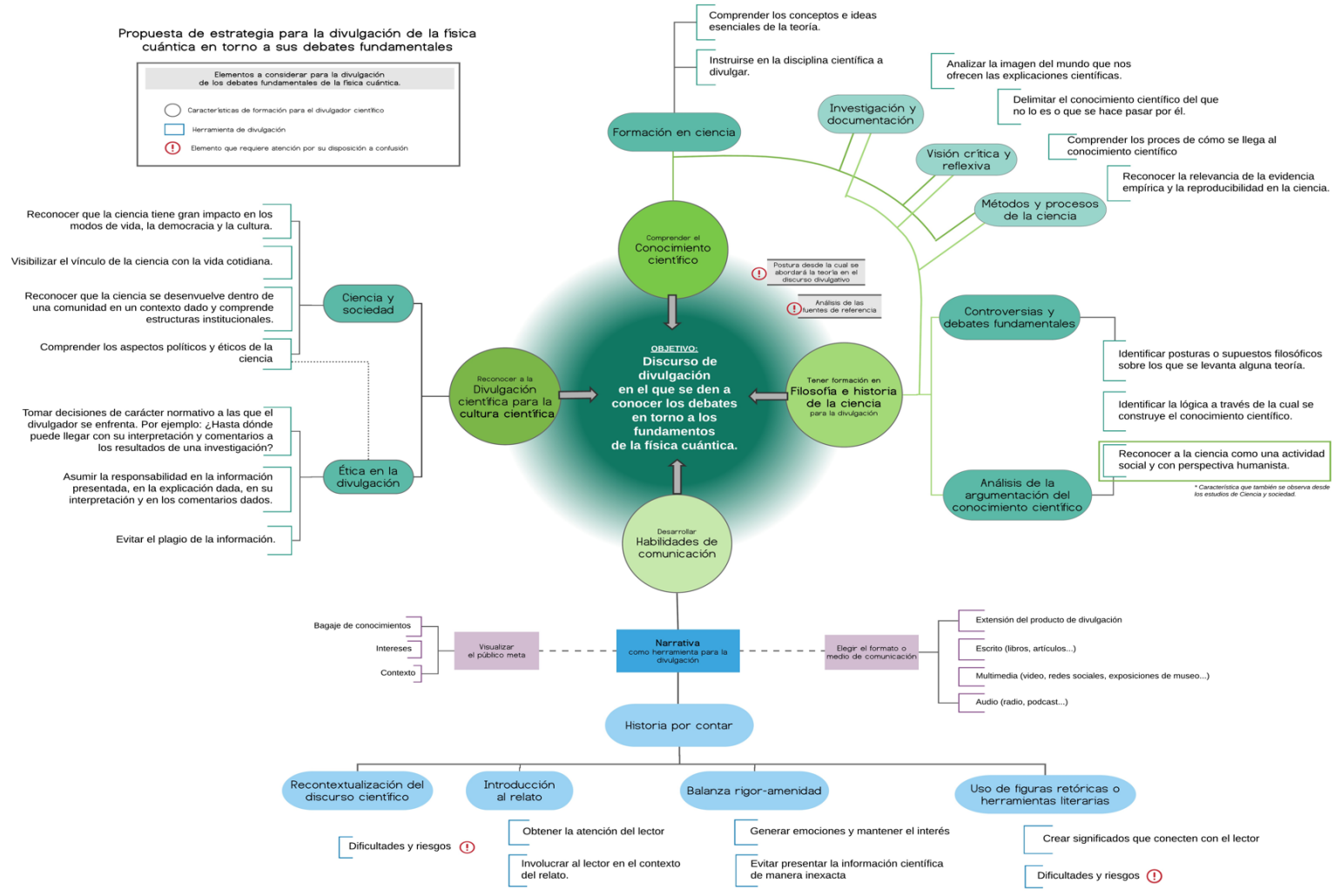


Fig. 4
Propuesta de estrategia para la divulgación de la física cuántica en torno a sus debates fundamentales

A continuación, exponemos cada uno de los elementos y sus implicaciones.

Reconocer la divulgación científica para la cultura científica

Reconocer la divulgación científica a partir de la visión de cultura científica implica comprender los diversos significados que se le han dado a esta noción. Mencionaremos algunos y nos detendremos en la acepción de cultura científica que aquí nos interesa¹²¹.

Considerar la actividad de divulgación como una labor para alcanzar la cultura científica, en un primer sentido, es reconocer a la ciencia como una actividad humana integrada a la sociedad que se desarrolla dentro de un contexto cultural (Bucci, M. & Trench, 2014). Esta idea se opone a la imagen de la ciencia como una actividad aislada de la sociedad en general, la cual es realizada por un grupo de personas especializadas en temas específicos y que hablan en un lenguaje técnico que difícilmente podría ser comprendido. Esta imagen de la ciencia, que podría valorarse como un prejuicio, ha de motivar a que se le considere como una actividad poco atractiva y que no es para todos (Sánchez Mora, 2010).

Tomando en cuenta lo anterior, vemos que la divulgación no sólo se trata de un trabajo de traducción del lenguaje científico al lenguaje común, ni tampoco solo de la comprensión o la capacidad de explicar correctamente los hechos científicos, sino que parte de su labor es comprender y comunicar que la ciencia es una actividad integrada a la sociedad, pues ella tiene un gran impacto en los modos de vida, la democracia y la cultura (Davies, S. R. & Horst, 2016).

En el estilo de vida de las sociedades contemporáneas se observa la dependencia del hombre hacia los recursos que ha provisto el avance de la tecnología y la ciencia. Solo basta observar ciertos objetos que se tienen alrededor, como los autos, las computadoras, televisores, refrigeradores, celulares, etc. En el ámbito de la salud se percibe en los métodos de diagnóstico y tratamiento, solo por mencionar algunos. A pesar de la conexión de la ciencia con la vida cotidiana actual, la idea de la ciencia como parte de la cultura es algo que se encuentra oculto, el trasfondo científico de los objetos y procesos con los que estamos familiarizados resulta invisible para muchos. En este sentido la divulgación tiene un rol para elucidar estos vínculos.

¹²¹ En esta sección retomamos algunas ideas expresadas en el primer capítulo de la tesis.

La misma transformación de los modos de vida, en los que se observa la integración de los avances en ciencia y tecnología, ha repercutido en que éstas se consideren un asunto público y de politización. Hoy en día es frecuente encontrar que se respalde la idea de la participación ciudadana en temas de ciencia y tecnología, pues esto se valora como un principio democrático y una condición de gobernanza (López Cerezo, 2005, p. 351). Sobre este supuesto, se considera que a través de la divulgación científica se busca que la población pueda contribuir en la toma de decisiones en las que se implique comprender cómo se produce el conocimiento científico, sus limitaciones y consecuencias.

Para alcanzar lo anterior se apela a la promoción de la cultura científica en la sociedad, la cual ha de recaer en la labor de divulgación científica. Esto es, una sociedad con cultura científica, como indica Olivé (2007, p. 35), ha de comprender más a fondo cómo se genera y se desarrolla el conocimiento científico, “con sus virtudes y sus riesgos, que la ciencia se trata de una actividad en la que se implican valores, creencias, intereses, formas racionales de discusión y en la cual se utilizan ciertos métodos confiables para aceptar o rechazar creencias que generalmente conducen a predicciones exitosas”. Entendiendo lo anterior, tanto el ciudadano, como el político o el responsable de políticas públicas en ciencia y tecnología tendrán los instrumentos conceptuales de la ciencia para la toma de decisiones (Ibid., p. 28), en donde se comprenda la naturaleza de la ciencia y sus efectos en la sociedad.

De manera concreta, la idea de cultura científica también implica reconocer cómo se produce el conocimiento científico, así como sus limitaciones y consecuencias, permitiendo formar un sentido crítico hacia las prácticas científicas y no contemplarla como un dogma (Davies, S. R. & Horst, 2016; Estrada, 2002, 2014). Algo relevante en esto es que identificar el proceso del conocimiento científico favorece el desarrollo del sentido crítico y racional, esto también permitirá reconocer y rechazar las ideas pseudocientíficas que se pudieran presentar.

En este sentido, consideramos que el divulgador de la ciencia tiene que comprender lo que implica la noción de cultura científica para así poder transmitir las ideas con mayor claridad para el público.

En la divulgación de la ciencia, desde una perspectiva de cultura científica, el discurso divulgativo no se limita a la difusión de resultados o datos; pues si sólo se aborda desde esa perspectiva estaríamos hablando de una divulgación pragmática en la que no se toman en cuenta los diversos enfoques desde los cuales se puede analizar y entender la ciencia.

Ahora bien, otro aspecto a considerar que se desprende de considerar a la divulgación como una actividad que busca fomentar la cultura científica es el aspecto ético de la divulgación. Esto se refiere a la ética profesional en esta actividad, en donde el divulgador puede enfrentarse a decisiones de carácter normativo. Por ejemplo, algunas de las preguntas que conllevan un dilema ético son: “¿Puede el propio gusto del divulgador influir en la selección de información o fuentes? ¿Es responsable de las consecuencias de una publicación? ¿Hasta dónde puede llegar con su interpretación y comentarios de los resultados de una investigación?” (Willems, J., & de Bruin, J., 1996)

Dado que el contenido de divulgación muchas veces es el primer acercamiento a un tema determinado, tanto el discurso divulgativo como el divulgador se vuelven referencias. En ese sentido, el divulgador adquiere responsabilidad en la información presentada, en la explicación dada, en su interpretación y en los comentarios dados. Parte de la responsabilidad con la información presentada radicaría en realizar un serio trabajo de documentación e investigación de fuentes para lograr comprender correctamente lo que se va a divulgar.

Comprender a la ciencia y a la divulgación de la ciencia como parte fundamental para promover la cultura científica será un pilar que permitirá valorar a la ciencia desde su relación con la sociedad. En el caso de la física cuántica, permitirá construir una divulgación en la que se muestren sus controversias y debates en sus fundamentos, así como exponer sus limitaciones, lo cual podría contribuir a evitar que el divulgador y el público saque de contexto las conclusiones que sólo son válidas para los fenómenos en la escala de las partículas.

Tener formación en **Filosofía e historia de la ciencia para la divulgación científica**¹²²

Otro elemento fundamental que nos permitirá configurar el tipo de divulgación que buscamos es el estudio en filosofía e historia de la ciencia, es decir, que el divulgador de la ciencia reconozca los puentes que se crean entre estas disciplinas. Para el caso particular de la divulgación de la física cuántica, la planeación del producto de divulgación tendría que incluir trabajo de investigación y documentación sobre historia y filosofía de esa rama de la física.

¹²² Cabe señalar que al hablar de formación no nos referimos a una formación con grados académicos en dichas disciplinas, sino que bastaría que el divulgador de la ciencia contara con el conocimiento básico sobre filosofía e historia de la ciencia.

Instruirse en un primer momento en historia y filosofía de la ciencia general implicaría comprender el proceso de cómo se llega al conocimiento científico y cómo funciona la ciencia; entender esto ampliaría la visión estrecha que comúnmente se tiene respecto a las etapas del método científico –observación, hipótesis, experimentación, análisis, comprobación, teoría y ley–¹²³.

Jane Maienschein (2000), historiadora y filósofa de la biología, sintetiza los razonamientos tradicionales del porqué la historia de la ciencia es relevante para comprender el proceder de la ciencia, aquí recogemos su clasificación.

El primero de ellos surge de las motivaciones dadas por George Sarton, considerado como el fundador de la historia de la ciencia como disciplina de estudio, quien señaló que la “ciencia es una actividad humana, la cual enfatiza la creatividad y la humanidad del hombre”. La reflexión dada por Sarton destaca el estudio de esta disciplina como parte del humanismo intrínseco en la actividad científica; para él, la “historia ilumina la ciencia y nos hace mejores”. Otra de las ideas que presenta Maienschein es la de Ernst Mach, físico y filósofo austríaco quien suscribió el positivismo, él señaló que conocer la historia permitirá “juzgar libre y correctamente el significado de cualquier movimiento científico”. Para Mach, la historia de la ciencia nos “proporciona juicio y claridad”. Por otro lado, Maienschein también retoma a Holton y Brush para mostrar que la historia de la ciencia es una disciplina desde la cual es posible promover “la comprensión pública de la ciencia y la alfabetización científica”. Esta última idea nos remite a los objetivos que se persiguen en la divulgación científica y, en este sentido, la historia de la ciencia jugaría un rol esencial para alcanzarlos.

Hasta aquí hemos aludido a los señalamientos que valoran el alcance que tendría la comprensión de la historia de la ciencia, no obstante, es importante señalar que la filosofía de la ciencia también nos auxiliaría para lograr otros propósitos relevantes para la divulgación científica y que, en conjunto, filosofía e historia, proporcionarían un entendimiento más íntegro respecto al proceder de la ciencia en general y en particular de la física cuántica.

Con la filosofía de la ciencia se cuestiona a la ciencia como proceso de conocimiento, busca comprender los fundamentos de la ciencia, analiza la lógica en la argumentación de sus principios básicos, busca entender cómo funciona la ciencia, es decir, discernir las

¹²³ Me parece que es relevante señalar que la estructura básica que comúnmente se conoce como “método científico” pudiera resultar útil por ser ilustrativo al mostrar características esenciales del proceder de la ciencia; sin embargo, esconde otros elementos de importancia para comprender a la ciencia cabalmente.

características esenciales del conocimiento científico y cómo ellas permiten delimitar ese conocimiento del que no lo es o que se hace pasar por él¹²⁴. De igual modo, la filosofía de la ciencia también busca comprender el vínculo entre lo que muestran los datos empíricos y lo que nos dicen las teorías científicas sobre ellos, esto es, analizar la imagen del mundo que nos ofrecen las explicaciones dadas por las teorías con relación a la información empírica; en este sentido, es importante destacar que las explicaciones y la imagen que nos proporciona la ciencia se va transformando de acuerdo a los nuevos hallazgos que vayan surgiendo.

Sobre esto último, habrá que resaltar la relevancia del concepto de evidencia empírica, uno de los elementos fundamentales que distinguen al conocimiento científico, el cual supone reflexión epistemológica por parte de la filosofía de la ciencia. Este consiste en un paso importante en el proceso de la ciencia, que ayuda a los científicos a contrastar sus ideas, ya sea que sean probadas o mostrar problemas en las ideas preconcebidas. La importancia de esto recae en que a partir de la evidencia empírica se le otorga fiabilidad y certeza a las teorías científicas.

Otra de las características a resaltar del proceso científico es la fase de replicación. Es importante detenernos un poco aquí pues es algo que el divulgador tendría que considerar al estar valorando sus fuentes de información. El proceso de réplica en la ciencia consiste en que los resultados o conclusiones de cierta teoría sean capaces de ser reproducidos o repetidos por otros colegas; en la base de esto encontraremos los métodos o el proceso que se siguió para llegar a las conclusiones establecidas. Esto tiene como objetivo probar lo establecido por la teoría y la solidez de los resultados experimentales, así como mostrar que los hallazgos o conclusiones a las que se llegaron cuentan con credibilidad (Longino, 2016). Además, este ejercicio permite a los científicos advertir los errores que en un primer momento no se detectaron, situación que posibilitaría la modificación y el mejoramiento del proceso.

No obstante, a pesar de esos ideales para la replicación, es importante señalar que se trata de un tema que hoy en día está en debate pues se vincula con la idea de fraude en la ciencia, ya que se afirma que los intentos de replicación se realizan con poca frecuencia, situación que estaría excluyendo parte del proceso de confirmación y abre paso a la proliferación de posibles resultados equívocos sin que sean advertidos. Ante esta

¹²⁴ De esto se habló un poco a lo largo del tercer capítulo de esta tesis.

problemática, el divulgador de la ciencia como parte de su trabajo de investigación y documentación tendrá que examinar el tipo de conclusiones que le ofrecen sus fuentes.

Hacemos mención de ello pues dentro de la divulgación de la ciencia es posible encontrar productos que muestran conclusiones que podrían resultar sorprendentes pero que no hacen referencia a su evidencia empírica o a otros estudios que avalen dichas ideas, promoviendo así una divulgación de la que se debería sospechar; esta situación se deja ver en algunos productos de divulgación sobre física cuántica.

Con la filosofía de la ciencia es posible analizar los elementos hasta aquí mencionados, además de abarcar otros aspectos fundamentales de la ciencia que nos permitirán comprenderla y analizarla desde una perspectiva distinta. Tanto los propósitos de la historia como de la filosofía de la ciencia nos proporcionan recursos relevantes para la labor de comunicación y divulgación científica.

Analizar los fundamentos de la ciencia nos permitirá detectar las posturas o supuestos filosóficos sobre los que se levanta alguna ciencia. Si aplicamos esos cuestionamientos en la historia de la física cuántica encontraremos que la narrativa histórica dibujada por los fundadores de esta teoría siguió ciertos supuestos filosóficos para establecer y difundir su interpretación; esto es, los supuestos seguidos por la interpretación ortodoxa; asimismo, observaremos que esa postura no fue la única y surgieron otras posiciones respecto al significado que se le da al formalismo matemático. Por otro lado, también advertiremos la perspectiva humanista de la ciencia, idea que se relaciona con la noción de cultura científica que ya hemos abordado. Esta característica es relevante para la divulgación dado que aporta un componente atractivo y de accesibilidad para el público.

Otra avenida para acercarse y comprender la actividad de la ciencia es a través de los estudios sociales de la ciencia, disciplina en la que se entremezclan ideas que se derivan de la filosofía e historia de la ciencia, y en la que a través de ella también se analiza a la ciencia como una actividad social. Una de las perspectivas desde la que se estudia a la ciencia es valorarla como una forma de acción comunicativa, además de examinar cómo se le presenta a la sociedad. Al considerar a la ciencia como acción comunicativa se afirma que la ciencia se manifiesta, fundamentalmente, a través de discursos verbales y escritos en un lenguaje propio (Nielsen, 2013; Calsamiglia, 2000; Cassany, D. et. al., 2000; Gutiérrez Rodilla, 1998); dichos discursos dependerán de ciertos contextos sociales e históricos. En la divulgación de la ciencia son ese tipo de discursos los que se busca traducir o recontextualizar, como le llaman algunos, a un lenguaje natural para que sean comprendidos por un sector más

amplio de la sociedad. Para la divulgación y comunicación de la ciencia, esa óptica nos aportaría instrumentos para evaluar la percepción pública de la ciencia, factor de suma importancia para el diseño y análisis de la divulgación científica.

Considerar el amplio abanico de perspectivas desde las cuales se puede observar la ciencia, proporcionadas tanto por la filosofía e historia de la ciencia, así como por los estudios sociales de la ciencia, nos permitirá conformar un enfoque en el que se revele a la ciencia como un proceso social e histórico que produce conocimiento; del mismo modo, descubriremos a los personajes que están detrás de ese conocimiento, quienes no solamente establecen dicho conocimiento a partir de un proceso, sino que también buscan el consentimiento y aprobación de sus colegas, con quienes pudieran competir, por decirlo de alguna manera, por demostrar y justificar sus ideas.

De igual modo, la comprensión de la ciencia desde estas disciplinas ayudará a identificar distintas perspectivas desde las que se ha estudiado y narrado la ciencia, lo que fomentaría el pensamiento crítico y con el que se haría frente a una postura dogmática de la ciencia. Por otro lado, tanto la historia de la ciencia como la filosofía de la ciencia nos proporcionan fundamentos para comprender la dinámica que se ha desarrollado entre la ciencia y los públicos; ambas disciplinas permiten analizar las formas de representación que la ciencia ha desarrollado para comunicarse con cierto público; especialistas o un público más amplio.

Si contemplamos los aspectos filosóficos, históricos y sociales de la ciencia descubriremos la evolución de pensamiento por la que pasan los científicos, situación que se hace presente en la historia de la física cuántica con varios de los fundadores de la teoría, como sucede con los razonamientos de Louis de Broglie. A pesar de las particularidades relacionadas con el carácter social de la ciencia que cuestionan la imagen de un sistema con verdades absolutas, se ha de reconocer que la ciencia nos proporciona conocimiento verosímil que se va reformando a través del tiempo. (Hull, 1988; Longino, 2016; Maienschein, 2000)

Hasta aquí hemos planteado algunos aspectos que nos aportaría el análisis de la ciencia desde la filosofía e historia de la ciencia para la tarea de divulgación científica, los cuales nutrirán la percepción y el entendimiento de la ciencia en general, y en particular de la física cuántica. Reflexionar sobre la ciencia desde esos enfoques nos permitirá reconocerla de manera distinta a la que se nos presenta en diversos medios, en la que se

dibuja como una actividad que se ajusta a un orden, como lo es el clásico método científico. La siguiente cita de Maienschein expone de manera esencial lo dicho hasta el momento:

“[...] la historia es lo suficientemente interesante, y la filosofía es lo suficientemente valiosa. Pero tomados en conjunto, hacen mucho al hablarnos sobre la ciencia y al pinchar la cómoda ilusión popular sobre cómo funciona la ciencia”. (Maienschein, 2000)

En este sentido, subrayamos la necesidad de que la formación del divulgador científico debería implicar el estudio de estas disciplinas para que dicho conocimiento se vea reflejado en la planeación y en el discurso de los productos de divulgación.

Considero que la formación en ambas disciplinas para el divulgador de la ciencia actúa como una piedra angular que proporciona herramientas para lograr una investigación y documentación de nuestras fuentes de una manera más crítica y reflexiva.

La dificultad de divulgar la ciencia, y en este caso, la física cuántica, está en función del entendimiento que tenga el divulgador o comunicador de la ciencia sobre el tema. Para explicar y mostrar los conceptos e ideas de la teoría, así como sus conflictos, es indispensable que se comprenda la materia que se quiere difundir para después proceder a su traducción a un lenguaje común; en este sentido, el trabajo de investigación y documentación sobre el tema cobra relevancia. Al realizar esto, será posible seleccionar la información relevante para los propósitos que se quisieran alcanzar con el producto de divulgación.

En resumen, la formación en las disciplinas ya mencionadas permitirá advertir las controversias y debates fundamentales que aparecen en la historia de la física cuántica y que hoy en día todavía es posible encontrar. Asimismo, el comprender cómo funciona la ciencia y los elementos esenciales que la caracterizan nos permitirá crear un juicio respecto a aquello que se hace pasar como científico, de tal manera que sea compartido en los productos de divulgación dirigidos a un amplio público. Dejar ver estos aspectos enriquecerá la imagen que se muestra de la ciencia.

Comprender el **conocimiento científico**

Otra característica de formación para divulgador y que resulta esencial para su tarea es contar con el conocimiento científico sobre el tema que pretende divulgar. Ello proporcionará la materia prima, por decirlo de alguna manera, para crear el discurso divulgativo.

Es importante destacar que con este elemento no nos referimos a la necesidad de que el divulgador científico tenga una formación profesional en alguna ciencia, sino que el divulgador, proveniente de cualquier otra disciplina, reconozca como necesidad su preparación respecto al tema a desarrollar, esta particularidad conlleva estudio, investigación, documentación y hasta entrevistas con los profesionales o expertos en el área.

Instruirse en la disciplina o tema a divulgar permitirá comprender los conceptos e ideas esenciales a divulgar, con esto se obedecería con el rigor científico de la información presentada; elemento que la divulgación no debe descuidar. Asimismo, la formación desde la ciencia fomentará la visión crítica y reflexiva, característica que permitirá también evaluar las fuentes de información a consultar, pues también contribuye a identificar el conocimiento científico de aquel que no lo es o se hace pasar por él. Estas particularidades, como podemos ver, son compartidas con la visión que forma la filosofía de la ciencia. Del mismo modo, con la formación en ciencia será posible distinguir los métodos y procesos de la ciencia.

Desarrollar Habilidades de comunicación

El dominio del tema que se va a divulgar es un aspecto esencial para la labor de divulgación, sin embargo, para el divulgador de la ciencia no es suficiente contar con el conocimiento científico, sino que también necesita de habilidades de comunicación. Para la divulgación esto significa hacer un buen uso del lenguaje, garantizar que la información transmitida sea recibida correctamente por el público, es decir, supone la claridad en el mensaje sin perder su aspecto de rigor, y que al mismo tiempo resulte amena y mantenga la atención del público.

En este sentido es que consideramos a las habilidades de comunicación como una característica de formación necesaria para el divulgador.

Sobre esto, es posible señalar que hay quienes se les facilita la capacidad de transmitir la información con claridad y amenidad, elementos fundamentales para el discurso divulgativo, pero hay otros a los que esta labor se les dificulta. En este sentido, la falta de pericia no es algo que pueda obstaculizar el trabajo del divulgador, puesto que se trata de una particularidad que se puede ir formando y desarrollando a través del adiestramiento apropiado y la práctica.

Aquí proponemos a la narrativa como un recurso que permite desarrollar un discurso que permite cumplir con la balanza rigor-amenidad que se procura en la divulgación. En la siguiente sección observaremos las características por las cuales consideramos a la narrativa como una herramienta conveniente para el tipo de divulgación que hemos aludido a lo largo de la tesis.

Narrativa como herramienta para la divulgación científica

Diseñar un producto de divulgación en el que se abarquen todas las perspectivas desde las cuales se estudia la ciencia parecería algo complicado, es decir, una divulgación en la que se muestre a la ciencia como una actividad que genera cierto conocimiento, y que a la vez está enmarcada por un contexto histórico, social y filosófico. Sin embargo, a pesar de la aparente complejidad que eso representa, en la presente tesis planteamos la narrativa como un esquema sobre el cual se puede desarrollar un relato divulgativo que abarque los aspectos mencionados anteriormente: la filosofía e historia de la ciencia, la noción de cultura científica y, por su puesto, el conocimiento científico.

En este capítulo ya hemos hablado de la narrativa y aquí la retomamos a manera de recapitulación para reiterar sus ventajas y cómo ella podría contener las características que buscamos en la divulgación.

Como ya se ha dicho en apartados anteriores, con la narrativa¹²⁵ no solamente se podría crear una historia que genere emociones y mantenga el interés del lector, sino que también a través de esa historia sería posible promover la comprensión de quien la percibe (Green, 2006; Lamarque, 2014; Negrete, 2008; Oatley, 2008). También hemos dicho que lo que se busca transmitir a través de la divulgación no se restringe a los conceptos e ideas de la física cuántica, sino también mostrar las controversias que han surgido de sus fundamentos.

En la presente tesis hemos estimado que con la narrativa sería posible representar la historia de la física cuántica y los debates alrededor de ella, mostrando cómo ha sido el proceder de esta ciencia. Esto, con la intención de desmitificar la presentación de los pasajes exitosos que comúnmente se observan en las representaciones divulgativas. De igual modo, hemos sostenido que desde un esquema narrativo sería posible mostrar y advertir al público de las manifestaciones que han surgido alrededor de la teoría cuántica y

¹²⁵ Cfr. 4.3 “La narrativa como un recurso para la divulgación de la ciencia”.

su engañoso vínculo con el misticismo. Como lo mencionó Sagan (2005), propiciar el entendimiento del cómo se procede en la ciencia y cómo se llega a ciertas conclusiones haría frente a las posturas de superstición o a las creencias en ideas que se hacen pasar por científicas.

Al pretender una divulgación que muestre lo anterior podría surgir la duda de que si al revelar este tipo de divulgación se estaría demeritando la importancia, utilidad y alcances de esta ciencia; para evitar esta posible perspectiva, sería necesario que además de mostrar los debates fundamentales de la teoría se haga referencia a la relevancia que ha tenido la teoría para la historia de la ciencia, como para los avances tecnológicos con los que gran parte de la sociedad convive.

Ahora bien, las preguntas esenciales que se deberían de responder para diseñar un relato serían las siguientes: ¿qué se va a contar?, ¿cómo se va a contar?, ¿desde que perspectiva se contará?, y ¿a quién se le va a contar? Esta última pregunta tiene que ver con determinar el posible público al que estará dirigido el producto de divulgación, aspecto del cual hablaremos más adelante.

En la historia o relato a contar es importante evitar el abuso de explicaciones y descripciones, pues este tipo de exposiciones podría cansar al lector y éste podría abandonar la lectura, recordemos de nuevo la balanza entre rigor y amenidad. Hay que tener presente que al optar por presentar el producto de divulgación a partir de una estructura narrativa, la historia y su trama solamente deberán tener una complejidad suficiente para que resulte una historia atractiva y lograr mantener el interés del lector, evitando crear confusiones causadas por la trama o por el exceso de explicaciones científicas.

En la planeación del relato o historia es importante prestar atención en el diseño de la introducción. Este paso que pareciera obvio resulta uno de los problemas prácticos en la actividad de divulgar. Hacer referencia a él cobra importancia pues es el espacio donde el lector obtiene los primeros indicios de que lo que se está comunicando está dirigido a él y, por lo tanto, se obtiene su atención. Para ello, en la introducción se podría presentar e involucrar al lector en el contexto de lo que se pretende exponer.

La mayoría de las publicaciones divulgativas que analizamos en la presente tesis siguen esta tendencia, en específico aquellas que se desarrollan sobre una estructura de relato histórico, pues los autores deciden presentar el contexto en el que se encontraba la física y las dificultades a las que se enfrentaban los físicos a partir de la catástrofe

ultravioleta; después de dicha presentación los autores muestran cómo se llegó a solucionar dicha dificultad. En este sentido, una exposición del contexto implicaría compartir información relacionada con la historia de la ciencia y sus personajes, exposición de antecedentes y anécdotas que permitan, de cierta manera, mantener el interés en el lector. No obstante, si se decide crear una historia de ficción, el autor tendría que concebir una atmósfera en la que el lector genere interés y empatía por la historia.

Mostrar aspectos con los que el público se sienta identificado podría resultar una dificultad para la divulgación de la física cuántica, debido a los objetos y fenómenos que ella estudia, ya que no son elementos con los que estemos familiarizados; por lo que situar al lector en un contexto en el que se pueda identificar o que le permita recrear un vínculo directo con el mundo subatómico resulta un desafío para la creatividad, sin embargo, esto no debería ser una limitante. Un estilo de introducción que intenta cumplir con lo anterior es insertar al lector en una historia que sucede en el mundo atómico. Este tipo de proceder lo observamos en algunos textos de divulgación¹²⁶; donde el autor crea un escenario de ficción para que el lector se “sitúe” en un ambiente en el que se perciben los fenómenos cuánticos. Este tipo de exposición es muy útil porque permite al lector generar imágenes de los procesos que acontecen en la escala atómica, sin embargo, requiere un gran trabajo de creatividad, en el que se cuiden las posibles interpretaciones que puedan surgir por parte del lector.

En la sección de introducción es importante atrapar al lector, en el sentido de generar el interés por conocer qué sucederá en la historia; el autor de divulgación no debería asumir que el lector está motivado con anticipación y siempre hay que tener presente que los lectores podrían abandonar la lectura si no se sienten atraídos. Atendiendo a lo anterior, el inicio del relato o de la narración juega un papel esencial para toda la historia que se va a contar; en ella es aceptable dejar un poco de lado la exposición del contenido científico y dar paso a la exposición de anécdotas o crear un contexto de ficción que permita conectar con el público y crear interés por la historia que se va a desarrollar posteriormente. En esta sección también es válido señalar, de alguna manera, la problemática que se va a desarrollar a lo largo del escrito. Ejemplo de ello lo hemos visto en varios de los textos de divulgación analizados; como hemos mencionado, algunos de los autores comienzan su escrito

¹²⁶ Ejemplo de ello se ve en el texto de *Alicia en el país de los cuantos* de Robert Gilmore, y también en los cuentos de George Gamow.

presentando la preocupación de los físicos por dar una explicación a la radiación del cuerpo negro y la dificultad a la que se enfrentaban con las herramientas que les ofrecía la física clásica; después de presentar la problemática muestran la solución a la que llegó Planck en 1900.

Hay quienes inician el discurso haciendo alusión a los avances tecnológicos que se han creado a partir del desarrollo de la física cuántica, los cuales podrían ser identificados fácilmente por el lector. Sin embargo, este tipo de preámbulo resulta un poco forzado, pues desde el análisis hecho en la tesis hemos encontrado que en un primer momento se capta la atención del lector haciendo referencia a dicha tecnología, pero, de pronto, el autor da un salto a exposiciones de carácter teórico, al presentar los conceptos y explicaciones desde un lenguaje técnico. Este tipo de proceder representa un problema en la narrativa de la divulgación pues, aunque podría resultar una introducción atractiva para el lector, el no seguir una secuencia en el tipo de lenguaje utilizado puede influir en la atención del lector.

En este momento es importante volver a referir a la balanza rigor-amenidad como lo representa López Beltrán (1985) o el equilibrio en el contenido narrativo y de ficción como lo representa Randy Olson (2015), dicha armonía se deberá mantener en lo que resta de la exposición divulgativa para evitar que el texto se desvíe de sus propósitos divulgativos. A pesar de que muchos de los lectores podrían mostrar un interés inicial, cabe reiterar que no es un público obligado, por lo que el divulgador deberá cuidar el texto y su contenido en función del público.

Además de pensar en cómo se debería iniciar el relato divulgativo también es importante pensar en las figuras retóricas o herramientas literarias que se van a utilizar a lo largo de la historia. Estas herramientas podrían ser las metáforas, analogías, símiles, entre otras. Ellas desempeñarán un papel importante para recontextualizar y crear imágenes en el lector, permiten relacionar ideas que le pudieran parecer extrañas con algo con lo que esté familiarizado. La presentación divulgativa a través de estos recursos deberá conectarse con conceptos de sentido común que se utilizan usualmente en la sociedad y a partir de esos referentes construir el significado que se quiera comunicar. (Calsamiglia, H. & van Dijk, 2004)

Como ya se ha mencionado en páginas anteriores¹²⁷, a pesar de las ventajas que proporcionan las figuras retóricas para transmitir un mensaje, en la divulgación de la física

¹²⁷ Cfr. 4.2 "Dificultades y desafíos para la representación divulgativa de la física cuántica"

cuántica habremos de tener un mayor cuidado en su aplicación por las repercusiones interpretativas a las que podría llegar el lector. En este sentido, sería importante tener presente una proyección de hasta dónde podría llegar el mensaje y qué interpretación podría dar el lector, así como el uso que le podría dar a la información.

Es importante reiterar los elementos a considerar que Goatly (1997, p. 135) propone para construir metáforas en función del receptor: conocer el idioma, conocer el contexto y conocer el entorno situacional y sociocultural del público; pues un factor que contribuye para atribuir el significado es el contexto en el que esté ubicada la metáfora.

En lo que respecta a la presentación de los fenómenos explicados por la mecánica cuántica, hay que evitar las extrapolaciones injustificadas al momento de mostrar los rasgos que parecen extraños o contraintuitivos; si bien es cierto que la teoría se caracteriza por representar este tipo de fenómenos, me parece que no es conveniente exagerar sus alcances, por el riesgo de provocar interpretaciones erróneas.

Por último, con respecto a las interpretaciones erróneas, es importante señalar que el público está en riesgo de encontrarse con una gran cantidad de información tergiversada que se ha difundido en diversos medios de comunicación. Algo que podría disminuir este tipo de eventualidades es que en la planeación del producto de divulgación se valoren fuentes de información confiables para recomendar a los lectores que quisieran profundizar un poco más en el tema, dichas recomendaciones podrían señalarse de manera acotada o dentro del contenido.

Hasta aquí hemos descrito cuatro características de formación para el divulgador que le permitan construir el tipo de divulgación que proponemos: reconocer a la divulgación científica como parte esencial de la cultura científica, la formación básica en filosofía e historia de la ciencia, contar con la formación científica del tema que se va a divulgar y contar con habilidades de comunicación, en esta última característica proponemos a la narrativa como un recurso divulgativo para diseñar el discurso de divulgación en el que se evidencien los debates fundamentales de la teoría cuántica. Esto es, los anteriores elementos nos permitirán atender a un estilo de divulgación en el que se represente a la física cuántica desde diversas aristas y en el que el público se forme una imagen más completa de la ciencia en general.

Por último, es importante señalar otros dos elementos necesarios al momento de diseñar el discurso de divulgación: visualizar al público meta y elegir el formato o medio de comunicación en el que se va a presentar el discurso.

En la tesis nos hemos enfocado en la divulgación escrita en libros, sin embargo, es importante señalar que diseñar cualquier producto de divulgación para cualquier medio, siempre implicará tener un guion escrito, ya sea para un video, para un podcast, algún programa de radio, presentación oral, etcétera. En este sentido, consideramos que las características que hemos descrito son elementos básicos para diseñar el producto de divulgación independientemente del medio que se elija, pues finalmente el texto se trata de un formato base desde el cual se puede estructurar el guion para cualquier otro medio.

Para completar esta última sección de la tesis desarrollaremos cómo la estructura de la narrativa está vinculada con el público meta que se establezca y el medio o formato de divulgación, por lo que también los hemos contemplado como otros dos elementos de nuestro esquema de estrategia.

Visualizar al público meta

Por lo general se dice que el público de la divulgación científica es un “público general”; aludir a esa etiqueta es hablar de una noción muy heterogénea, pues abarca diversos grupos sociales los cuales podrían ser niños de preescolar, niños que cursan la educación básica, adolescentes de educación media, estudiantes en una carrera profesional, adultos mayores, políticos, tomadores de decisiones, pobladores de diversas regiones con diversas culturas, etcétera. A pesar de que todos los miembros que componen ese universo pueden o no compartir cierto idioma, cada uno de ellos se comunica de manera distinta dado su propio contexto, es decir, estos grupos pudieran diferir en intereses, cultura, creencias, conocimiento u otros factores. En este sentido, es muy recomendable que el autor de divulgación conciba al público al que se estará dirigiendo y atienda a sus características particulares para crear un puente desde su discurso.

En el gráfico presentado al inicio de esta sección, en el que se esquematiza la propuesta de divulgación, vemos que los bloques de Visualizar el público meta y el de Elección del medio o formato de comunicación se sitúan al mismo nivel que el bloque Narrativa como herramienta para la divulgación. Esto se debe a que el relato que se desee contar deberá tomar en cuenta el público meta que se haya concebido, así como del medio en el que se presentará el discurso de divulgación. Es decir, en la estrategia que proponemos consideramos que determinar el público meta al que se quiera dirigir el producto de divulgación moldeará la historia que contar y que también funcionará como guía para la profundidad a la que se va a llegar en la investigación y documentación.

Determinar al público no necesariamente delimitará los alcances del producto, pero si permitirá tener mayor control en el diseño del contenido, el lenguaje y las herramientas a utilizar, es decir, nos permitirá proyectar las figuras retóricas a utilizar e identificar el contenido de ciencia que se va a transmitir.

En diversos momentos de la tesis hemos mencionado que el público no es una *tabula rasa* a la que se le tiene que imprimir el conocimiento; no hay que perder de vista que el público es capaz de seguir argumentos y cuenta con un bagaje de conocimientos y creencias, los cuales están en función de sus propios contextos. Estas características tendrían que ser valoradas en el proceso de diseño y construcción del producto de divulgación.

Si no se toma en cuenta lo anterior y se piensa que el autor que divulga aleccionará a su público estaríamos apelando al modelo de déficit en la divulgación, en el que la relación entre el producto de divulgación y el público es jerárquico y unidireccional. Es decir, el producto de divulgación contiene y transmite cierto conocimiento que el público no tiene, y este último se considera como un agente pasivo que recibe la información, de la cual no se recibe alguna retroalimentación. En ese modelo, la información que se busca transmitir hacia el público son los resultados de la ciencia sin interesarse por el proceso por el que pasa el conocimiento científico. Por su parte, en el modelo contextual, a diferencia del anterior, además de transmitir el conocimiento científico se pretende mostrar el carácter social de la actividad científica, su contexto, sus procesos y dificultades. Asimismo, se busca reconocer el vínculo entre la ciencia y la sociedad, o bien, el vínculo entre la ciencia y su público, al igual que se busca establecer un diálogo entre ambos.

La propuesta de divulgación que hemos dibujado podría aparentar que está apoyada en el modelo de déficit, en el sentido de crear un producto de divulgación escrito en el que difícilmente se produce una comunicación entre autor y lector que no sea unidireccional. A pesar de ello, al momento de considerar un análisis previo de los públicos el esquema propuesto pretende alejarse de este modelo. Otra característica fundamental que hemos planteado y que no obedece a este modelo es contemplar el aspecto histórico y filosófico de la ciencia, elementos que desde el modelo de déficit no se toman en consideración.

Podría decirse también que en cierto sentido la propuesta sigue al modelo de déficit si se considera que el producto sería en el formato de libro tradicional, en el que la comunicación pareciera darse de manera lineal, de autor a lector, en el que difícilmente se establece comunicación de retroalimentación con los lectores. Como respuesta a esto

hemos de señalar que el autor de alguna manera ha de entablar un vínculo con los intereses, contexto y bagaje de conocimiento del lector al momento de visualizar su público o lector meta, dado que estos elementos actuarán como guía para el diseño del discurso. Esta situación no se valora desde el modelo de déficit. Por otro lado, el proceso de lectura al que se enfrenta el público implica un proceso de comunicación entre el autor y el lector, donde el lector es capaz de construir significados a partir de su interacción con el texto y su conocimiento previo, en este sentido se podría generar una retroalimentación interna en función de su conocimiento previo.

A pesar de que los modelos podrían ser una guía en la divulgación de la ciencia tanto para su análisis como para su diseño, como se ha mencionado en el primer capítulo de la tesis, ambos modelos no son rígidos ni excluyentes, sino que sus características podrían combinarse en un mismo proyecto. En este sentido, el esquema de divulgación que hemos propuesto creemos que está más apegado al modelo contextual, dado que las características de formación que hemos señalado muestran mayor proximidad a los rasgos de ese modelo.

Por último, es importante destacar que la evaluación de públicos como parte del diseño y desarrollo del producto de divulgación aportará indicios de la percepción pública sobre el tema y permitirá capturar ideas que funcionen como herramientas para atraer al público. Sin embargo, este último ejercicio dependerá del tiempo que se disponga para el diseño y creación del producto de divulgación, y el tiempo de planificación está estrechamente vinculado con el medio o formato de divulgación.

Elección del medio o formato de comunicación

En la presente investigación analizamos la divulgación escrita con el formato de libro, no obstante, existen otros formatos en los que la divulgación escrita se presenta, como lo son los artículos en revistas, en diarios, carteles, etcétera. El formato resulta relevante pues a partir de él se determinará la extensión del texto y por consiguiente, el contenido que se le va a proporcionar al público. A pesar de que solamente hemos hecho mención del medio escrito, es destacable mencionar que éste actúa como un formato básico para cualquier otro medio de divulgación, dado que en cualquier medio es recomendable crear un guion como estructura base para el desarrollo del proyecto de divulgación. En este sentido, el guion resulta ser un escrito en el que se diseña la propuesta de divulgación y en el que se

percibirán las ideas de cada uno de las características que hemos propuesto en el esquema de divulgación.

El formato de divulgación en el que se vaya a presentar la información tiene una repercusión directa con el tipo de narrativa a desarrollar, pues es el medio el que restringe la duración de la planeación y la extensión o cantidad de información a presentar. Con esto, solamente se busca advertir de la relevancia de este elemento para el diseño y proyección de cualquier producto de divulgación.

Finalmente, a manera de cierre, la estrategia que hemos esbozado se estructura a partir de cuatro características o elementos:

- Comprender el conocimiento científico a divulgar.
- Desarrollar habilidades de comunicación.
- Reconocer a la divulgación científica para la cultura científica.
- Tener formación básica en historia y filosofía de la ciencia para la divulgación científica.

Consideramos que el conjunto de estos elementos y aplicarlos en un relato de narrativa permitirán construir el tipo de divulgación que sugerimos; aquella que contemple y presente los debates fundamentales de la física cuántica. Dado que la estructura se basa en conceptos clave que se tendrían que reconocer para así desarrollar el discurso divulgativo, es posible que esa estructura se aplique a la divulgación de debates fundamentales que surgen en otras ciencias.



CONCLUSIONES

En esta sección recuperaremos los objetivos planteados para la tesis y observaremos cómo se fueron alcanzando a través del desarrollo de los capítulos. Asimismo, mostraremos de forma sintética algunas de las resoluciones que ya se han perfilado a lo largo de la investigación.

El objetivo principal en el presente trabajo fue proponer una estrategia de divulgación que abarque los debates que surgieron a partir de las implicaciones ontológicas y epistemológicas de la física cuántica, la cual permita promover un acercamiento racional y un entendimiento más claro e íntegro del tema en el público no especializado.

Para llegar a ese objetivo se formularon otros objetivos específicos: examinar las características fundamentales de la teoría cuántica que han promovido discusiones alrededor de las implicaciones ontológicas y epistemológicas de la teoría. Estudiar dichas características fundamentales permitiría analizar una selección de textos de divulgación sobre esta ciencia para evaluar en qué medida y cómo hacen referencia a esas características y a los debates fundamentales implícitos en ellas. Asimismo, con el análisis de los textos se busca evidenciar las dificultades de la actividad de divulgar esta ciencia, y advertir de los riesgos que se presentan, dado que podría desembocar en una “divulgación pseudocientífica”¹²⁸.

Al tener presente cómo se han expuesto los cuestionamientos hacia los fundamentos de la teoría cuántica, así como las dificultades y riesgos que se presentan al divulgar la teoría, se buscó construir una imagen del tipo de divulgación que se ha producido alrededor de la teoría. Con ello, se determinaron herramientas y aspectos a considerar para conformar una estrategia adecuada de divulgación en la que se evidencien las controversias y debates de la teoría. Esto es, el análisis de los modos de divulgación de la física cuántica nos permitió tener otras perspectivas para concebir un modelo diferente para la divulgación de esta ciencia.

¹²⁸ Este tipo de divulgación lo entendemos como aquel que se muestra como un discurso que expone a la ciencia pero que se apropia de ciertas concepciones de la teoría para apoyar argumentos que quedan fuera de su alcance explicativo.

A lo largo de los capítulos se procuró cubrir cada uno de los objetivos específicos, para así, cumplir el objetivo principal. Ahora mostraremos los resultados que se derivan de lo expuesto en los capítulos.

Observamos cómo la divulgación escrita de la física cuántica sigue vigente. La divulgación de esta ciencia no se restringe al medio escrito, sino que su alcance en los medios se ha ampliado, pues no solamente encontramos publicaciones editoriales, sino que con el desarrollo de otros formatos de comunicación como las redes sociales o plataformas de video, encontramos proyectos de divulgación que se transmiten a través de ellos, los cuales ofrecen un acceso rápido y logran gran alcance por la diversidad de públicos a los que pueden llegar. En este sentido es relevante señalar que la divulgación en los otros medios ofrece una diversidad de interrogantes que podrían valorarse para el desarrollo de futuras investigaciones. Quienes se dedican a la divulgación de la ciencia y a su investigación tienen la tarea de analizar estos nuevos medios, sus posibilidades, sus alcances y sus limitantes. Algunas de estas cuestiones podrían estar destinadas a evaluar el alcance que tienen los nuevos formatos de comunicación para la divulgación, así como las estrategias empleadas para comunicar un mensaje de manera efectiva y responsable, que cumpla con el cuidado de la información, precisión y sea atractivo para el público.

En la revisión de las publicaciones de divulgación sobre el tema se advirtió que los objetivos que los autores persiguen son un tanto diversos; promover vocaciones, mostrar el alcance que la teoría ha tenido en la tecnología y el estilo de vida, esclarecer las ideas extrañas que se derivan de la teoría, divulgar para satisfacer la curiosidad de conocer, entre otros. Todos estos propósitos se adhieren a los objetivos básicos que se han planteado en la divulgación de la ciencia en general¹²⁹. Algo destacable es que no encontramos que los autores tuvieran como objetivo principal el mostrar las controversias que surgen de la física cuántica, hemos de advertir que esta situación se aleja de uno de los varios propósitos que se persiguen en la divulgación de la ciencia, en el que se afirma que a través del trabajo divulgativo se muestra al público la realidad científica “sus valores, prácticas, críticas, aplicaciones, sus problemas, etcétera”. (Del Rio, F., 2003)

Se determinó que los objetivos de la divulgación científica se pueden clasificar en dos aspectos: por sus propósitos culturales y por sus pretensiones sociopolíticas (Sánchez Mora, 2010). Tomando en cuenta esta distinción, a primera vista pareciera que los autores

¹²⁹ Cfr. CAPÍTULO 1. La divulgación de la ciencia; el caso de la física cuántica.

obedecen a los objetivos de carácter cultural. Sin embargo, haciendo un análisis más profundo, podríamos considerar que también siguen, quizá de manera involuntaria, los objetivos del aspecto sociopolítico, en el sentido de que se busca promover y difundir cierta postura de la interpretación de la teoría cuántica. Esta perspectiva se advierte a partir de ciertas afirmaciones que los autores hacen, en las que se manifiesta que el discurso se basa en la interpretación ortodoxa; como lo hacen Chad Orzel en *Conversaciones de física con mi perro* (2009), Brian Cox y Jeff Forshaw en *El Universo cuántico. Y por qué todo lo que puede suceder sucede* (2011) y David Jou en *Introducción al mundo cuántico* (2014).

Dentro de la selección de publicaciones recientes observamos que hay ciertas alusiones a las controversias que surgen desde la interpretación de Copenhague, pero no ahondan en ello, ni señalan el alcance que dichas controversias tienen para la teoría.

Considerando lo anterior, es posible comprender, en cierto sentido, la falta de una exposición un poco más amplia sobre los debates fundamentales en la teoría; si apelamos a que los autores que analizamos no pretendían mostrar esas particularidades de la teoría, postura que, de cierto modo, respalda los supuestos establecidos en la interpretación de Copenhague y que los compromete con una actitud instrumentalista sobre la que descansa esa interpretación¹³⁰.

Por otro lado, observamos que dentro de las publicaciones existe una tendencia a calificar a la teoría con los adjetivos “misterioso” o “enigmático”. Es decir, hoy en día la caracterización de la teoría a partir de esos adjetivos prevalece, puesto que dicha situación se ha percibido desde los primeros trabajos de divulgación alrededor del tema –los cuales fueron retomados y examinados en el segundo capítulo–.

En suma, haber revisado el contexto actual de las publicaciones divulgativas en física cuántica en el primer capítulo nos revela la vigencia y perspectiva de la divulgación de esta ciencia, también nos evidencia que la teoría se presenta con adjetivos que encierran misterio y que, en ocasiones, se muestra una imagen de la teoría como un tema que podría resultar complejo para el lector. Sobre esto último, es importante mencionar que este escenario no es favorable para ningún trabajo de divulgación pues se estaría generando resistencia en el público hacia el tema, dado que en un primer momento se le está presentando como algo complicado; ejemplo de esto es el abuso de la frase atribuida a Richard Feynman: “puedo decir con toda tranquilidad que nadie entiende la mecánica

¹³⁰ Cfr. APÉNDICE D: Cuadro comparativo entre interpretaciones realistas e interpretaciones instrumentalistas para la física cuántica.

cuántica”, ésta es común encontrarla en presentaciones de divulgación; como hemos mencionado, este tipo de alusiones podría significar distanciamiento por parte del público, situación que no se desea en los discursos divulgativos.

A pesar de esto, los adjetivos de misterio también podrían resultar atractivos para el público, y al mismo tiempo podrían suponer un reto del cual se podría alardear inteligencia.

Además de considerar esta ambivalencia en las implicaciones que trae consigo la caracterización de la teoría a partir lo misterioso o enigmático, hay que tener cierto cuidado en su uso pues estas mismas características son las que se han promovido en la “divulgación pseudocientífica”. Ante esta situación, hemos de sugerir que en el discurso de divulgación se esclarezca al público el por qué la teoría ha resultado extraña respecto a los principios establecidos desde la física clásica y en qué reside su complejidad, para así evitar que estos adjetivos sean erróneamente asociados con ideas místicas. Esto es, ir más allá de la mera presentación y descripción de los fenómenos cuánticos.

Ahora bien, en el segundo capítulo se examinaron algunas características fundamentales de la teoría cuántica que han promovido discusiones alrededor de sus implicaciones ontológicas y epistemológicas: comportamiento dual de los componentes mínimos de la materia, relaciones de indeterminismo y el papel de la observación en las mediciones cuánticas.

El análisis y reconocimiento de estas características se realizó en una selección de textos publicados en un periodo dado, publicaciones que aparecieron casi a la par del surgimiento de la teoría, a finales de la década de 1920, hasta publicaciones de la década de 1970, lo que permitió trazar una especie de línea evolutiva de las publicaciones divulgativas sobre el tema, pues se advierte que el contenido obedece en un primer sentido al estado en el que se encontraba la teoría y, también, a las características propias del autor. Con respecto a lo primero, evidentemente, las primeras publicaciones sobre el tema no presentan conceptos e ideas que aparecieron posteriormente, como el concepto de entrelazamiento, la no localidad, o los desarrollos de computación cuántica, ideas que sí se exponen en publicaciones más actuales. En relación con las características de los autores, una de las primeras observaciones que hicimos fue el estilo de lenguaje utilizado por cada uno de ellos. Cada uno ofrece variaciones en el estilo de exposición, situación que se asocia a diversos factores, como la formación del autor, la época en que se publicó el libro y por supuesto, los objetivos y público meta determinado para cada texto.

La diferencia en el estilo también se evidencia en el uso de lenguaje científico y formulaciones. Es importante destacar esta particularidad, pues esto juega un papel relevante para delimitar o restringir el público al que podría llegar el discurso. Ejemplo de ello se observó en el texto de Louis de Broglie, quien hace uso de tecnicismos de manera recurrente. Esta característica muchas veces se dice que no es recomendable en un discurso de divulgación, sin embargo, es importante resaltar el papel que juega el público meta al que está dirigido, pues si ese público meta son aquellas personas que ya cuentan con un conocimiento en el área pero que buscan introducirse en algún tema que no están familiarizados, se podría decir que es razonable el uso de tecnicismos y formulaciones. Ante esta situación, sería recomendable que todo divulgador haga la advertencia al lector desde las primeras páginas para evitar algún desencanto o frustración en el público que no fue considerado al crear el discurso.

Un rasgo que comparten todos los autores de los textos estudiados es que utilizan herramientas literarias que permiten crear imágenes en el lector y motivar el entendimiento. Algunas de estas herramientas son las analogías, metáforas, reiteraciones, y comparaciones, las cuales permiten ampliar o detallar las descripciones y explicaciones, crear ejemplos que remitan a la vida cotidiana, y hay quienes desarrollan su exposición a través de experimentos mentales, como lo hacen Einstein e Infeld y George Gamow.

Sobre esto, es destacable subrayar que las herramientas literarias consisten en instrumentos fundamentales y muy recomendables para la divulgación de cualquier ciencia, dado que promueven una mejor comprensión de las ideas; a pesar de ello hay que considerar las dificultades que de ellas surgen.

Las complicaciones que surgen en la divulgación de la física cuántica resultan del hecho de que la representación del mundo cuántico se trata de un territorio del cual no tenemos una experiencia directa: los fenómenos que ocurren a escala microscópica no tienen equivalente en nuestra escala, encontramos formulaciones paradójicas y nociones que se alejan de nuestro sentido común, ideas que nos parecen extrañas. Esta condición de la teoría plantea complicaciones para trasladar el significado de los conceptos a imágenes cotidianas que permitan al lector conformar una comprensión clara.

A pesar de lo anterior, no se está rechazando el uso de herramientas literarias para construir cierto significado con la mayor claridad posible¹³¹. Es tarea del divulgador

¹³¹ Ejemplo de ello lo podemos observar en varias de las publicaciones de divulgación que elegimos para su análisis,

considerar y enfrentar las dificultades que pudieran surgir en este aspecto, ya que su trabajo, precisamente, radica en elegir las palabras precisas que evoquen una imagen o idea clara en el lector, tratando de prever las posibles malinterpretaciones y confusiones que pudieran surgir en el público, haciéndole entrever que lo expuesto son aproximaciones, por lo que no deberían interpretarse literalmente.

Reconocemos que el análisis y evaluación de estas herramientas por parte del divulgador es una tarea esencial para prever los alcances que estas podrían tener en la transmisión de significados al público. Para esto sería conveniente que el divulgador consulte a los expertos en la disciplina para evaluar la trascendencia del discurso divulgativo. Cabe resaltar que el trabajo de divulgación es multidisciplinar y colaborativo, recordemos que el divulgador se auxilia de diversas disciplinas que analizan y estudian a la ciencia desde diversos vértices.

Ahora bien, con respecto a las características que se eligieron para analizar en los textos de divulgación, observamos que los tres temas aparecen en todos los textos seleccionados –comportamiento dual de los componentes mínimos de la materia, relaciones de indeterminismo y el papel de la observación en las mediciones cuánticas–. Sin embargo, los debates que están detrás de estas características muchas veces permanecen ocultos.

El comportamiento dual de los componentes mínimos de la materia fue uno de los primeros planteamientos que se consideraron como ideas semilla para la física cuántica, por ser una de las primeras conclusiones que surgieron cuando la teoría se estaba construyendo. El carácter dual de los componentes mínimos de la materia u objetos cuánticos es un tema común en los discursos de divulgación; la imagen que surge de la mera designación funciona, en un principio, para atraer al lector. Con la descripción y explicación de esta característica se le hace ver al lector la destacable diferencia de lo que sucede en la escala de las partículas con lo que se percibe en fenómenos a nuestra escala, en los que no se aprecia la naturaleza dual.

Analizar cómo se expone dicha característica en el discurso de divulgación permitió advertir que los autores no suelen mostrar el contexto, las implicaciones y controversias

pues en ellas se hace uso de estas herramientas, las cuales evocan imágenes que facilitan la comprensión de las ideas y conceptos de la teoría.

que acarreó esa nueva idea para el entendimiento de la naturaleza, sino que solamente presentan al fenómeno como una característica peculiar para los sistemas cuánticos.

Una de las consecuencias de no presentar el contexto, en este caso sobre la concepción del comportamiento dual para los objetos cuánticos, sería la pérdida del significado que representó en su momento para la física. Es decir, se ocultaría el periodo de transición que se percibió en la historia de la física, entre la física clásica y la teoría cuántica. La importancia de considerar estos antecedentes para la divulgación de esta ciencia reside en brindarle un contexto al público de cómo fueron evolucionando las ideas a partir de una problemática dada, y así, se incorporaría y se mostraría el proceder de la ciencia.

En la representación divulgativa de las relaciones de indeterminación y el papel de la observación se puede afirmar que el discurso divulgativo se apoya en la interpretación de Copenhague y, en este sentido, adoptan cierta postura filosófica desde la cual interpretan a la teoría¹³². Tal interpretación, como se ha señalado, ha tenido mayor prevalencia y difusión tanto en la formación profesional en el estudio de la física como en los discursos de divulgación.

Con esto hemos de señalar que la divulgación a partir de la interpretación de Copenhague puede llegar a tener implicaciones sobre cómo el público comprende los fundamentos de la naturaleza, hasta a aceptar, sin un sentido crítico de por medio, lo que en algún momento afirmaron los partidarios de esta interpretación, quienes llegaron a suspender el juicio respecto a la realidad objetiva, así como rechazar la posibilidad de las tesis deterministas para explicar los fenómenos cuánticos.

La exposición referente al papel de la observación en las mediciones cuánticas cobra importancia por ser un tema que muestra una relación muy estrecha con los fundamentos de la teoría, en vista de que si se realiza una indagación sobre el tema surgen cuestionamientos a los supuestos esenciales de la interpretación ortodoxa. Al rastrear cómo se expone este tema en los textos elegidos encontramos que los autores hacen referencias hacia él, pero que las afirmaciones que se le presentan al lector podrían dar lugar a interpretaciones erróneas, dada la propia complejidad de la idea. A pesar de las referencias al tema no se profundiza sobre la trascendencia que tiene para los fundamentos de la teoría ni de las complicaciones que se asoman cuando se indaga un poco más. Los autores que hacen una breve referencia a las implicaciones filosóficas de los fundamentos

¹³² Cfr. APÉNDICE D: Cuadro comparativo entre interpretaciones realistas e interpretaciones instrumentalistas para la física cuántica.

de la teoría suelen señalar que se trata de cuestiones que no son relevantes dado que no afectan a la práctica o a las predicciones tan exitosas que nos arroja el formalismo.

Considerar lo anterior, nos permite reconocer la relevancia de diseñar un discurso de divulgación de la física cuántica que vaya más allá del esquema común con el que se presenta la teoría. Es decir, no sólo mostrar lo establecido por la interpretación de Copenhague, sino exponer los supuestos sobre los que se construye y evidenciar los cuestionamientos que surgen de ellos. Tener presente esto, permitiría advertir las diferencias que surgen desde otras interpretaciones.

En este sentido, hemos de suponer que si se optara por un discurso divulgativo en el que se evidenciaran los cuestionamientos que hay detrás de este tema, se permitiría promover una comprensión más íntegra respecto a las interpretaciones que surgen para comprender la teoría. Además, impulsaría una postura más crítica y fomentaría la indagación en aquellos que tengan mayor interés en el tema.

Es importante señalar que no se está rechazando la divulgación del éxito predictivo de la teoría o de sus aplicaciones tecnológicas, sino que este tipo de divulgación puede ir más allá al cuestionarse cómo es que la teoría funciona y alcanza dicho éxito y aplicaciones, esto es, interesarse por sus fundamentos teóricos. Si se considera lo anterior estaríamos apelando a uno de los objetivos básicos para la ciencia y su divulgación, como lo es conocer y entender la naturaleza.

Por otra parte, recordemos que en la presentación del indeterminismo en Eddington y Jeans los autores desarrollan ideas en las que se vinculan los conceptos de la física cuántica con aspectos de la conciencia o la mente, dicha situación nos permite advertir que estos textos fueron como una especie de semilla de otras publicaciones en las que se extrapola lo establecido por la teoría hacia otros ámbitos. A pesar de esto, algo destacable de estos autores es que ellos precisan en qué momento están hablando de conclusiones personales, situación que no se percibe, por ejemplo, en el texto de Capra y en el que se promueve un entendimiento erróneo de los alcances de la teoría.

Advertimos que, al menos, hay dos factores que creemos han permitido que este tipo de divulgación se haya constituido. Primeramente, podemos observar que las aseveraciones de los propios fundadores de la teoría, como Bohr con su idea de complementariedad, Born y la relación que trazó entre la física y la política, Heisenberg, Bohm, entre otros, abren una puerta que es aprovechada por quienes vinculan a la teoría con aspectos externos a ella. En segundo lugar, la falta de claridad sobre el significado físico

de la teoría, o bien, la falta de una interpretación coherente también deja algunas fisuras que son aprovechadas por aquellos que buscan justificar ideales místicos relacionados con religiones orientales. (Dieks, D., 1996; Sus, A., 2017)

Otro tema relacionado con el discurso pseudocientífico alrededor de la física cuántica se refiere a las afirmaciones que se hacen desde diversas prácticas como la promoción de cursos, productos o de terapias alternativas, como la “medicina cuántica”, etcétera, en donde se compromete la salud y economía de las personas que confían en ello. Dado los alcances y riesgos que representa este tipo de discurso, el divulgador de la ciencia se enfrenta a una dificultad, pero también a una responsabilidad para “evitar o eliminar los engaños que se hacen pasar como divulgación científica” (Sánchez, 2010).

Todo lo anterior traza un vínculo con el problema filosófico de la demarcación, es decir, de la pregunta ¿cómo identificar los límites entre la ciencia y aquello que se hace pasar como científico?, interrogante que, como hemos observado, también ha de interesar a la labor de divulgación. Considerando esto, el divulgador o comunicador de la ciencia, familiarizado o no con el tema, se enfrentaría a las cuestiones: cómo no fiarse de fuentes no confiables, cómo no incurrir en argumentos pseudocientíficos, cómo se podría prevenir al público de las fuentes no confiables, cómo el público lego podría distinguir aquello que realmente pertenece a la teoría cuántica, es decir, lograr la delimitación.

Ante estas preguntas es necesario que el divulgador, en primera instancia, tenga claridad sobre el tema, además de que cuente con principios básicos de filosofía e historia de la ciencia que le permitan entender el proceder de la ciencia, y así poder comunicar al público la naturaleza de la ciencia, sus fundamentos, sus límites e incluso su estructura de poder (Pigliucci, M. & Boudry, 2013). Esto conllevaría que al público se le proporcionen herramientas que le permitan juzgar aquellas afirmaciones que parecen absolutas y que aparentan tener justificación científica, es decir, elementos que le permitan distinguir las dificultades que se atraviesan para llegar a ciertas conclusiones y que no pueden ser valoradas como absolutas. Reconocer lo anterior posibilitaría al lector tomar una posición crítica ante aquellas afirmaciones fuertes que aparentan un conocimiento categórico o dogmático, las cuales se presentan, generalmente, en discursos pseudocientíficos. En este mismo sentido, los divulgadores tendrían que enfatizar la importancia y el rol que juega la confirmación empírica en el proceder de la ciencia; así, se evidenciaría que aquellas afirmaciones que intentan justificarse por estar “vinculadas” con la teoría, no podrían cumplir con esta condición. Las observaciones anteriores están vinculadas con el objetivo

principal de la tesis y se contemplan en la estrategia de divulgación que presentamos.

En suma, frente al análisis hecho a las publicaciones elegidas, tanto pasadas como recientes, advertimos que en el discurso de divulgación existe una tendencia a presentar la física cuántica desde la interpretación de Copenhague, en la que difícilmente se evidencia una reflexión crítica hacia ella.

Creemos que si el objetivo de la divulgación de la física cuántica comprendiera también las controversias que están detrás de los supuestos de la teoría, el divulgador tendría que hacer ver al público las diversas posturas que han surgido respecto a cómo comprender el significado del formalismo de la teoría. Esto no descarta que el autor desarrolle un discurso apoyado en una interpretación y visión filosófica, sino que en dicho discurso se muestre con claridad la postura que es asumida, así como sus diferencias frente a otras posturas. Con lo anterior estaríamos apelando, en cierto sentido, a promover una divulgación responsable de la ciencia basada en la concepción de cultura científica, aspecto que forma parte de la estrategia establecida.

Por otro lado, aunque el análisis realizado en la tesis se centra en publicaciones editoriales, es relevante reiterar que uno de los retos a los que se enfrenta la comunicación de la ciencia en general es adaptarse a los nuevos medios de comunicación que pueden tener mayor alcance en el público, como lo son los medios digitales en redes sociales, blogs, videos, podcast, etcétera. La adaptación a estos nuevos medios no debe perder de vista los objetivos básicos que se buscan en la divulgación. En este sentido, el esquema de divulgación propuesto en esta tesis¹³³—conformado por cuatro características de formación para el divulgador: comprender la ciencia que se va a divulgar, desarrollar habilidades de comunicación, reconocer a la divulgación científica para la cultura científica y tener formación básica en filosofía e historia de la ciencia, destacando que la formación en estas disciplinas no implica una educación formal con grados académicos, sino que bastaría con tener cierta sensibilidad o conocimiento de ellas— podría considerarse como base para cualquier guión destinado a los nuevos medios de comunicación, incluso creemos que es un esquema que se adaptaría para la divulgación de los fundamentos de cualquier ciencia.

Recordemos que el esquema contiene las siguientes ideas: reconocer a la divulgación científica como una actividad que pretenda la cultura científica, contar con formación en filosofía e historia de la ciencia como parte del quehacer profesional en la divulgación, contar con el conocimiento científico necesario respecto a lo que se busca divulgar, y tener

¹³³ Cfr. CAPÍTULO 4. Sección 4.4: Estrategia para divulgar los debates fundamentales de la física cuántica.

habilidades de comunicación que permitan crear una narrativa en su discurso. Estas nociones las hemos valorado como elementos fundamentales que ayudan a crear una divulgación en la que no solo se presente algún concepto, idea o conclusión del conocimiento científico, sino también englobar aquellos aspectos que están detrás de los hallazgos, esto es, dichos elementos permitirán mostrar al público no especializado la manera de proceder de la ciencia, en donde se consideren rasgos característicos desde la historia, epistemología y ontología de la ciencia.

El propósito del tipo de divulgación que hemos planteado no pretende que el lector se convierta en un experto en la materia, sino que el hacerle ver los debates, que han acompañado a los conceptos y conclusiones que residen en los fundamentos, le permitan tener una cara más auténtica de la teoría. Con ello, también implicaría presentarle el proceder de la actividad científica, lo que fomentaría, en cierto sentido, un carácter más crítico y racional de cómo trabaja la ciencia en general. Es notable destacar que la imagen de la ciencia que se esté proporcionando al público no deje de lado su relevancia como aquella actividad que nos proporciona conocimiento confiable sobre el mundo que nos rodea, que a partir de ella se ha desarrollado cierta tecnología con la que convivimos en nuestra vida cotidiana, y que se trata de una actividad no finalizada, pues sigue un proceso en el que continuamente se cuestiona y se plantean nuevas reflexiones e investigaciones en busca de explicaciones coherentes. Esta situación va más allá de lo que, según lo analizado en la investigación, comúnmente se ha expuesto en la divulgación de la física cuántica.



Por último, es importante destacar que, a pesar de que hemos percibido una tendencia de presentar la teoría desde una sola interpretación sin mostrar las dificultades en sus fundamentos teóricos, como resultado de la revisión de publicaciones de divulgación sobre el tema hemos identificado algunas publicaciones que atienden ciertas de las características que hemos apelado a lo largo de la tesis, en el sentido de que hacen referencia a otras interpretaciones de la teoría además de la ortodoxa y, también, hablan, en mayor o menor medida, de las controversias que están detrás de esta interpretación. Estos textos podrían considerarse como un esfuerzo de presentar la teoría sin

comprometerse con una única postura. Ejemplo de este tipo de publicaciones son: *Alicia en el país de los cuantos* (1994) de Robert Gilmore y *Conversaciones de física con mi perro* (2009) de Chad Orzel, en ellos los autores dedican espacios para exponer al lector ciertas cuestiones a las que se enfrenta la interpretación de Copenhague, y también hacen referencia a las otras posturas que han propuesto interpretaciones distintas. Asimismo, encontramos las publicaciones de: *Quantum Sense and Nonsense* (2017) de Jean Bricmont y *What is real? The Unfinished Quest for the Meaning of Quantum Physics* (2018) de Adam Becker. Estos dos últimos son ejemplos de publicaciones en donde los autores se han preocupado, no solo por mostrar al lector que han surgido otras interpretaciones, sino que desarrollan un discurso divulgativo en el que exhiben las problemáticas fundamentales de la teoría. Bricmont indica en sus primeras páginas que la intención del libro “no es dar respuestas finales a los problemas conceptuales de la mecánica cuántica, sino más bien abrir la mente del lector a la posibilidad de que las respuestas puedan darse más allá de lo que se enseña en los cursos de la mecánica cuántica estándar”. Por su parte, Becker desarrolla la historia de la física cuántica con el objetivo de mostrar que la interpretación de Copenhague no es la única y que comprender al mundo a partir de la física cuántica no es una tarea fácil, dado que en sus fundamentos encontramos problemáticas que aún no se solucionan.

Con estas últimas publicaciones nos percatamos de los recientes esfuerzos que se están haciendo por divulgar la física cuántica desde una perspectiva que va más allá de la postura ortodoxa y que, además, muestran los cuestionamientos que encontramos en los fundamentos de la teoría, dicha situación nos habla de que la historia de esta ciencia no está concluida y de la relevancia de este tipo de divulgación.



APÉNDICES

APÉNDICE A. Listado de títulos de publicaciones divulgativas sobre física cuántica

APÉNDICE B. Vínculo entre filosofía y física

APÉNDICE C. Experimento de la doble rendija explicado por Richard Feynman

APÉNDICE D. Cuadro comparativo entre interpretaciones realistas e interpretaciones instrumentalistas para la física cuántica

APÉNDICE A

Listado de títulos de publicaciones divulgativas sobre física cuántica ¹³⁴

Año de primera edición	Autor	Título Original	Editorial ¹³⁵	Años de reimpressiones y/o nuevas ediciones Traducciones ¹³⁶
1928	Eddington, S. A.	The Nature of Physical World	- Cambridge University Press - Espasa y Calpe	1938 , 1942, 1953, 1981, 2005, 2010, 2011, 2012, 2014, 2015. Español , alemán, árabe.
1930	Heisenberg, W.	The Physical Principles of Quantum Theory	- Dover Publications	1949, 1968, 2011, 2013, 2014, 2015 Alemán, árabe.
1930	Jeans, J.	The Mysterious Universe	-Penguin	1931, 1932, 1933, 1937, 1940, 1942, 2007, 2008, 2009, 2010, 2017 Alemán, italiano, lituano, árabe.
1934	Eddington, S. A.	New Pathways in Science. Messenger Lectures.	-Cambridge University Press	2007, 2012, 2013, 2015
1937	De Broglie, L.	La Physique Nouvelle et les Quanta	-Flammarion -Editorial Losada	1965 , 1974 Español , inglés, italiano
1937	De Broglie, L.	Matière et Lumière	- Éditions Albin Michel - Espasa y Calpe	1939 , 1941, 1946, 1947, 2007, 2008, 2013, 2015, 2017 Español , Inglés, alemán, italiano, japonés, holandés

¹³⁴ Cabe señalar que el presente listado no es exhaustivo. Con él solamente se busca mostrar la mayor cantidad de publicaciones divulgativas sobre física cuántica que se han editado desde los inicios de la teoría. Con la información recabada se pueden distinguir aquellos textos que han tenido mayor difusión en función de las traducciones y nuevas ediciones.

¹³⁵ Las editoriales señaladas corresponden a la editorial de primera edición. En algunas publicaciones también se indican en negritas las editoriales que tienen su traducción en español.

¹³⁶ Los años señalados en negritas indican el año de la edición en español.

1938	Einstein, A., & Infeld, L.	The Evolution of Physics: The Growth of Ideas from Early Concepts to Relativity and Quanta	-Cambridge University Press -Editorial Losada -Editorial científica Salvat	1945, 1959, 1961, 1964, 1965, 1966, 1967, 1978, 1980, 1982, 1983, 1986 , 1990, 1993, 1994, 1995, 1998, 1999, 2000, 2002 , 2005, 2008, 2009, 2010, 2011 , 2013, 2015 2016, 2017 Español , alemán, francés, portugués, italiano, turco, árabe, checo, polaco, hebreo, vietnamita.
1938	Eddington, S. A.	The Philosophy of Physical Science. Turner Lectures.	Macmillan Company	1939, 1949, 1958, 2012, 2015
1939-40	Gamow, G.	Mr. Tompkins in Wonderland	-Cambridge University Press -Fondo de Cultura Económica	1960, 1965, 1967, 1986, 1991, 1993, 1995, 1997, 1999, 2009, 2012, 2013, 2014, 2016 *Traducido prácticamente a todos los idiomas en Europa, excepto el ruso.
1942	Jeans, J.	Physics and Philosophy	-Cambridge University Press -Librería del Colegio	1948 , 1981, 2000, 2003, 2008, 2009, 2010, 2012, 2014 Español , árabe
1944	Papp, D.	La doble faz del mundo físico	-Espasa - Calpe	1968
1947	De Broglie, L.	Physique et Microphysique	-Editions Albin Michel -Espasa-Calpe	1951 , 1955, 1966, 1996 Español , inglés, italiano, alemán
1951	Schrödinger, E.	Science and Humanism	-Cambridge University Press -Editorial Tusquets	1996, 2002, 2014 Español
1956	De Broglie, L.	Nouvelles Perspectives en Microphysique	Editions Albin Michel	1962, 1992, 2001 Inglés
1958	Heisenberg, W.	Physics and Philosophy. The Revolution in Modern Science.	Penguin Classics	1962, 1965, 1971, 1978, 1982, 1987, 1989, 1990, 1993, 1994, 1997, 1999, 2000, 2003, 2007,

				2008, 2011, 2013, 2014, 2015, 2017 Español , alemán, italiano, portugués, polaco, persa, árabe, croata, turco, griego, vietnamita
1961	Gamow, G.	Biography of Physics	-Harper & Brothers, Publishers -Revista de Occidente -Biblioteca Científica Salvat -Alianza Editorial	1962 , 1974, 1980 , 1983, 1985, 1987 , 1988, 1994, 1996, 1998, 2001, 2003 , 2011, 2012, 2014. Español , italiano
1962	Feynman, R.	Six Easy Pieces. Essentials of Physics Explained by Its Most Brilliant Teacher	-Basic Books -Editorial Crítica	1994, 1995, 1996, 1998, 2000, 2002, 2003, 2005, 2006 , 2007, 2008, 2010, 2011, 2013, 2014 , 2015, 2016 Español , alemán, italiano, rumano, árabe, turco, persa, estonio, polaco, holandés, tailandés, checo.
1964	Feynman, R.	The Character of Physical Law	-Modern Library -Tusquets Editores	1967, 1974, 1977, 1979, 1980, 1985, 1987, 1988, 1989, 1992, 1993, 1994, 1998, 1999, 2000 , 2001, 2002 , 2004, 2007, 2009, 2012, 2013, 2015 , 2016, 2017 Español , alemán, francés, checo, griego, polaco, japonés, croata, turco, italiano, árabe, finlandés, lituano, ruso, portugués.
1966	Gamow, G.	Thirty Years that Shook Physics: The History of Quantum Physics	Dover Publications	1972, 1985, 2012, 2014 Italiano
1969	Heisenberg, W.	Der Teil und das Ganze: Gespräche im Umkreis der Atomphysik Physics and Beyond: Encounters and	-Harper & Row, Publishers -Ellago	1971, 1972, 1973, 1975 , 1977, 1983, 1984, 1986, 1989, 1990, 1996, 2001, 2004, 2005, 2008, 2010, 2011, 2013, 2014 , 2015, 2016, 2017

		Conversations [tr. al inglés, 1971]		Español , Inglés, francés, italiano, coreano, japonés, portugués, persa, rumano, árabe, kurdo, ruso, checo, noruego, esloveno,
1969	Lovett Cline, B.	Men who Made a New Physics: Physicists and the Quantum Theory	- Signet - University of Chicago Press - Fondo de Cultura Económica	1973, 1987 Español
1980	Bohm, D.	Wholeness and the Implicate Order	-Routledge - Editorial Kairos	1981, 1983, 1989 , 1996, 2002, 2005, 2011, 2014 Español , vietnamita, portugués.
1984	Ortoli, S. & Pharabod, J.P	Le cantique des quantiques: Le monde existe-t-il?	-La Découverte -Gedisa	1985 , 1991, 1998, 2004, 2007 Español , italiano
1985	Herbert, N.	Quantum Reality: Beyond the New Physics	Anchor Books	1987, 2011, 2014
1986	Rae, A.	Quantum Physics. Illusion or Reality?	-Cambridge University Press -Alianza editorial	1988, 1994, 1998 , 2004, 2006, 2009, 2012, 2014, 2016 Español , árabe, griego.
1986	Davies, P. & Brown, J.	The Ghost in the Atom: A Discussion of the Mysteries of Quantum Physics	Cambridge University Press	1989, 1993, 1996, 2010, 2013, 2015 Chino, polaco, finlandés, tailandés
1987	Bohm, D.	Science, Order and Creativity	-Bantam - Editorial Kairos	1992, 1993 , 2000, 2010, 2014, 2015, 2016 Español , finlandés, turco
1992	McEvoy, J.P. & Zárate, O.	Introducing Quantum Theory. Graphic Guide	-Totem Books -Errepar	1997, 2000, 2003 , 2009, 2011, 2014

				Español , turco, persa, italiano, holandés.
1992	Clemente de la Torre, A.	Física cuántica para filo-sofos	-Fondo de Cultura Económica	2011
1994	Gilmore, R.	Alice in the Quantumland	- Copernicus Books - Alianza Editorial	1995, 1996, 1998, 2000, 2006 , 2007, 2012, 2018 Español , italiano, portugués, alemán, turco, checo, polaco
1996	Klein, E.	La physique quantique	- Flammarion - Editorial Siglo XXI	2003 Español
1997	Strathern, P.	Bohr and Quantum Theory	- Arrow - Editorial Siglo XXI	1998, 1999, 2003, 2012, 2013, 2014 Español , alemán, portugués, indonés
2000	De Régules Ruiz-Funes, S.	Cuentos cuánticos	- ADN Editores	2001
2003	Al-Khalili, J.	Quantum: A Guide for the Perplexed	-Orion Publishing - Alianza Editorial	2004, 2005, 2012, 2014, 2015, 2016 Español , alemán, italiano, polaco, griego
2004	Klein, E.	Petit voyage dans le monde des quanta	-Flammarion	2009, 2015, 2016
2005	Rae, A.	Quantum Physics: A Beginner's Guide	-Oneworld Publications	2010, 2012
2005	Chown, M.	Quantum Theory Cannot Hurt You	-Faber and Faber	2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2013, 2014 Alemán, árabe, checo, turco, polaco.

2005	Ouellette, J.	Black Bodies and Quantum Cats: Tales of Pure Genius and Mad Science	-Penguin Books - Editorial Norma	2006, 2007, 2008, 2010. Español , turco.
2008	Gilder, L.	The Age of Entanglement: When Quantum Physics was Reborn	-Knopf	2009, 2014
2009	Orzel, C.	How to Teach Physics to your Dog	- Oneworld Publications - Editorial Paidós - Editorial Ariel	2010, 2011, 2012, 2015, 2016. Español , alemán, italiano, holandés, checo, turco, tailandés.
2009	Holzner, S.	Quantum Physics for Dummies	-For Dummies	2010, 2012, 2013, 2014. Alemán
2010	Kakalios, J.	The Amazing Story of Quantum Mechanics	-Gotham	2011, 2012
2011	Cox, B. & Forshaw, J.	The Quantum Universe: Everything that Can Happen does Happen	- Allen Lane - Debate Editorial	2012, 2013, 2014 , 2016. Español , italiano, francés, checo, ruso.
2011	Fernández Vidal, S.	La puerta de los tres cerrojos	- La galera - Editorial Oceano (México)	2012, 2013, 2014, 2016, 2018 Alemán, italiano, portugués, catalán, griego, lituano.
2012	Gribbin, J.	Erwin Schrödinger and the Quantum Revolution	-Bantam Press	2013 Turco
2012	Cassinello Espinoza, A. & Sánchez, Gómez, J. L.	La realidad cuántica	- Crítica	2017 Portugués
2013	Rojo, A.	Borges y la física cuántica	- Editorial Siglo XXI	2015 Portugués

2014	Jou, D.	Introducción al mundo cuántico. De la danza de las partículas a las semillas de las galaxias	-Ediciones de pasado y presente	Única edición en español
2014	Susskind, L; Friedman, A.	Quantum Mechanics: The Theoretical Minimum	-Basic Books	2015, 2016, 2017 Italiano, polaco, ruso, turco.
2014	Schaposnik, F.A.	¿Qué es la física cuántica?	-Editorial Paidós	2015
2014	Clegg, B.	30 Second Quantum Theory: The 50 most thought-provoking quantum concepts	-Prospero Books - Editorial Blume	2015 Español, alemán, francés, holandés.
2015	Clegg, B.	The Quantum Age: How the Physics of the Very Small has Transformed our Lives	-Icon Books	2016 Turco
2016	Hacyan, S.	Mecánica cuántica para principiantes	-Fondo de Cultura Económica	
2016	Big Van, científicos sobre ruedas	Cómo explicar física cuántica con un gato zombi	-Alfaguara	
2017	Paz, J. P.	La física cuántica. Todo sobre la teoría capaz de explicar por qué los gatos pueden estar vivos y muertos a la vez	-Editorial Siglo XXI	
2017	Bricmont, J.	Quantum sense and nonsense	-Springer	
2018	Kaid-Salah Ferrón, K.	My first Book of Quantum Physics	-Button -Juventud	2018 Español
2018	Orzel, C.	Breakfast with Einstein: The Exotic Physics of Everyday Objects	-Benbella Books	
2018	Bub, T. & Bub, J.	Totally Random: Why Nobody Understand Quantum	-Princeton University Press	

		Mechanics. A series comic on Entanglement		
2018	Becker, A.	What is real? The Unfinished Quest for the Meaning of Quantum Physics	-Basic Books	



APÉNDICE B

Vínculo entre filosofía y física

La relación entre filosofía y física se remonta a los orígenes de lo que se conoce como pensamiento occidental en la época de la Grecia antigua, cuando los razonamientos de los filósofos griegos como Sócrates, Platón y Aristóteles contribuyeron a configurar el pensamiento filosófico. Esta última noción la podríamos entender como el estudio ordenado de la realidad y la naturaleza humana (Cushing, 2003). Dicha concepción, escrita *grosso modo*, conserva lo esencial de lo que consiste la filosofía¹³⁷. Es pues, en esta época en la que también encontramos los inicios de la física en la obra de Aristóteles (384-322 a.C.), quien acuñó el término “física” (en griego, Φυσική), mismo que daría título a uno de sus tratados en donde describe y analiza los cuerpos naturales¹³⁸. En su obra *Física*, Aristóteles definió a la física como la naturaleza de un objeto con “un principio y una causa del cambio y del reposo en la que se da primariamente por sí misma y no sólo en sentido accidental” (Aristóteles, 2005). Aristóteles se refería al movimiento natural de los objetos, enfoque que en esencia sigue imperando en la física actual (Maudlin, 2014). Cabe destacar que la física aristotélica, como una teoría del movimiento, dominó por muchos siglos, a pesar de las dudas que producía, hasta que llegaron las aportaciones de Copérnico, Kepler y Galileo, a quienes se les debe la primera organización de la ciencia moderna. (Abbagnano, 2012)

Antes de proseguir, es importante señalar que previamente a las reflexiones dadas por Aristóteles, otros pensadores ya habían aportado argumentos que se distinguían de un pensamiento mítico para mostrar las causas de los fenómenos naturales, pues trataron de no atribuir la justificación a los dioses y explicaban los fenómenos en términos de materia o fuerzas físicas. Uno de estos pensadores fue Tales de Mileto (625/4-546 a.C.), quien indicó que el agua se trataba del elemento básico que componía la materia; más tarde, Heráclito (540-480 a.C.) consideraría que el fuego era el elemento esencial de la materia. Así como ellos, otros proponían otros razonamientos para dar cuenta del comportamiento y conformación de la naturaleza.

Otra idea que también fue acuñada en esta época, y que en esencia sigue estando presente en los principios actuales de la física y que trata de responder cómo se constituye la materia, es la aportación de Demócrito (460-360 a.C.): el atomismo. Él argumentaba que el comportamiento de los cuerpos a nuestra escala podría estar basado en los elementos constitutivos de dichos cuerpos, elementos a los cuales nombró “átomos”. En este sentido, Demócrito consideró el átomo como la

¹³⁷ Si se busca aludir a una concepción precisa de la filosofía se abarcaría mayor espacio del que aquí se dispone, pues la concepción de esta materia ha sido un tema que ha sido ampliamente discutido dentro de la historia de esta disciplina.

¹³⁸ Cabe destacar que en esta época hacer física se trataba de una actividad meramente teórica.

partícula mínima con la que se construye la realidad, o bien, el átomo se trataba del elemento constitutivo de la materia. Los cambios en el pensamiento se han derivado de nuevas hipótesis planteadas y de la evidencia empírica, elementos que han sido parte del proceso de la ciencia moderna. Con esto, se revela que el interés por tener una explicación sobre los componentes últimos de la materia se ha dado desde el pensamiento griego clásico y aún prevalece en la física moderna.

Además de la preocupación por conocer cómo se constituye la materia, otro razonamiento que se ha implantado en la ciencia física ha sido el considerar un orden en la naturaleza. Galileo (1564–1642) estableció que este *orden* podría ser traducido al lenguaje matemático, con el cual se podría describir la metodología de la investigación física con términos sencillos y claros¹³⁹. Más tarde, Isaac Newton (1642–1727) buscó describir ese orden natural a partir de un cuerpo teórico organizado. En ambos casos se habló de un orden en la naturaleza, en el que estaría implícito admitir una causalidad necesaria; así, con la física, como la ciencia que estudia este orden, sería posible prever los fenómenos naturales (Abbagnano, 2012). Esta intención de buscar “prever” ha sido una característica esencial dentro de la física clásica y en cierto sentido ha guiado la idea de lograr una descripción de los fenómenos a partir de imágenes visuales.

Por otra parte, otro asunto sobre el que se ha cavilado tanto por los filósofos de la naturaleza de la antigua Grecia y que aún se debate entre físicos y filósofos es la postura filosófica del *Realismo*. Con ella surgen preguntas como: ¿qué es el mundo?, ¿qué clase de cosas hay en él?, ¿qué es verdadero acerca de estas cosas?, ¿qué es la verdad?, ¿son reales las entidades postuladas por la física teórica o sólo son construcciones de la mente humana? Sobre este tipo de cuestiones, enmarcadas dentro del terreno de la metafísica, así como de la ontología y epistemología, se ha escrito mucho en la historia de la filosofía de la ciencia del siglo XX. No obstante, este tipo de preguntas no se restringen a estas áreas propias de la filosofía, sino que se asoman cuando nos adentramos en los fundamentos de la física cuántica.

Sin la pretensión de dar una descripción exhaustiva de cómo se ha dispuesto el problema del realismo en la historia de la filosofía, se trazarán algunos planteamientos significativos que permitan perfilar dicha posición con la ciencia física. Haciendo una retrospectiva rápida sobre lo que se decía acerca de la realidad en la antigua Grecia, encontramos las posturas de Platón y Aristóteles, quienes creían en la existencia de un mundo externo independiente de la mente del observador; en este sentido defendían un realismo. No obstante, cada uno difería en particularidades. Por una parte, Platón indicaba que la realidad se encontraba alejada de la experiencia sensorial, mientras que Aristóteles postulaba la realidad en los objetos inmediatos a la

¹³⁹ Con respecto a esto, se ha hecho popular la frase “la naturaleza es un libro escrito en caracteres matemáticos” en Il Saggiatore (1623).

experiencia sensible. Para este último, el conocimiento resultaba de la percepción del mundo exterior, es decir, de la abstracción de los objetos externos que son percibidos; teniendo en cuenta esto, sería posible lograr la comprensión de una colección de experiencias, y con ello, sería posible apropiarse de un área de conocimiento. Si se observa con detenimiento lo anterior se puede percibir que, además de la preocupación sobre la realidad como un concepto que atañe a la ontología, también se cuestiona desde la epistemología, es decir, surgen preguntas sobre el conocimiento de aquello que se considere *real*.

Al situarnos en el siglo XVIII nos encontraremos con la aportación valiosa de Immanuel Kant en su obra *Crítica de la razón pura* (1781). En su texto, Kant identifica dos tipos de realismo: el trascendental y el empírico. En el realismo trascendental se consideraba a los conceptos de «espacio» y «tiempo» como conceptos independientes de nuestra sensibilidad, como intuiciones puras o condiciones de posibilidad para el conocimiento. Por otro lado, en el realismo empírico se reconocería la existencia de las cosas independientemente del observador. Esta última idea es la que, en esencia, ha prevalecido dentro de lo que se ha denominado realismo científico, en el que se supone la existencia de entidades, estados y procesos que están descritos por las teorías científicas correctas. (Hacking, 2001, p. 39)

Intentar abarcar las discusiones que han surgido en relación con el realismo llevaría más espacio y detalle del que se ha presentado aquí. La intención de hacer mención de este tema que ha interesado a la filosofía de la ciencia es mostrar una de las cuestiones en donde convergen filosofía y ciencia, y en específico filosofía y física. Con relación a la física cuántica, algunos han cuestionado la compatibilidad que esta teoría podría tener con una postura realista, pues a partir de la Interpretación de Copenhague o también conocida como Interpretación ortodoxa, la más difundida, se han motivado una serie de ideas acerca de la naturaleza de la realidad, situación que ha estimulado discusiones acerca del realismo dentro de la filosofía del siglo XX (Martínez, 2003, p. 127)¹⁴⁰. En la física cuántica, cuando se declara que no se pueden atribuir valores exactos a ciertas propiedades de los sistemas cuánticos hasta que hayan pasado por el proceso de medición, surge la pregunta sobre qué nos está sugiriendo la teoría sobre la realidad subyacente (Ibíd., 2003). Con respecto a esto último, hay que tener cuidado, ya que la noción de «medición» y sus implicaciones aún es un tema que en la actualidad provoca disenso entre los físicos. Este asunto se retomará en esta investigación con mayor atención. Cabe destacar que este asunto aparece en textos divulgativos como algo ya establecido, o bien no se percibe el alcance que ha tenido.

Hemos notado, pues, que la relación entre física y filosofía ha existido desde los inicios de la física en la antigua Grecia, pues ambas compartían el propósito de dar cuenta de la naturaleza

¹⁴⁰ En el APÉNDICE C se presenta un cuadro comparativo entre posturas realistas e instrumentalistas que subyacen a las interpretaciones de la física cuántica.

fundamental de las cosas. A causa de los razonamientos antes mencionados y otros que no han sido referidos por cuestión de espacio, es que los científicos físicos fueron nombrados, en su momento, filósofos de la naturaleza.

A pesar de compartir el propósito de dar cuenta de la naturaleza, la física tomó su propio camino al incorporar el método experimental y la evidencia empírica como un componente fundamental para llegar a un conocimiento certero de la realidad¹⁴¹. Al considerar los datos verificables o los fenómenos de la experiencia como parte de la metodología, se llegaría a una descripción y explicación de dichos fenómenos. Este soporte o fundamento empírico le permitió establecerse como una disciplina de especialización, permitiéndole desarrollar una complejidad a una velocidad muy rápida, tan rápida que el entendimiento cabal de ella por parte de quienes no están familiarizados con la disciplina se ha dificultado.

Por otro lado, el vínculo entre física y filosofía también se puede percibir en los presupuestos dados como elementos tácitos en las hipótesis, en otros términos, en aquellos supuestos que no necesitan una demostración por considerarse evidentes. En torno a esto último diremos, brevemente: dentro de los supuestos que se tienen dentro de la física se advierte que en esta disciplina se busca la objetividad en el proceso de conocer la naturaleza, se tiene la creencia de que hay un orden y simplicidad en la naturaleza y se supone una realidad externa al observador.

Con la física moderna, constituida principalmente por la relatividad y la física cuántica, las preocupaciones que colindan con la filosofía han surgido de manera notoria. En los inicios de la física cuántica encontraremos las aportaciones de Bohr, Schrödinger, Heisenberg y Einstein, por mencionar a los más célebres, a quienes se les podría considerar físicos-filósofos, tal como los califica Dean Rickles. (2008, p. 6)

Para concluir el presente apartado es importante destacar que entenderemos a la Filosofía de la física como aquella disciplina donde se entremezclan perspectivas originarias de la filosofía y de la física relacionadas con las preguntas filosóficas que subyacen en la física moderna. En este sentido, al menos cuando se está hablando de física teórica, la física y la filosofía de la física no muestran distinción significativa (Rickles, 2008, p. 6). Con respecto a esto, el físico Tim Maudlin (2014) menciona que la filosofía de la física se ocupa de la realidad física en su totalidad y al considerarla disciplina, afirma, es una prolongación de la propia física. De esta manera se puede comprender que la línea divisoria entre física y filosofía no es tan clara, pero que el interés de la filosofía va un poco más allá de la teoría, pues busca esclarecer lo que la teoría nos está diciendo sobre el mundo.

¹⁴¹ Tomando en este momento el término «realidad» de la manera más habitual y sin entrar en la discusión que se plantea desde la filosofía de la ciencia.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente se podrá sostener una incuestionable relación entre física y filosofía. No obstante, tal relación no es totalmente evidente para los que no están relacionados con esta ciencia o incluso para los que se dedican a la investigación en esta área. Sólo son algunos quienes se acercan eventualmente a las reflexiones sobre ideas filosóficas (Howard, 2005), por lo que tal situación de desconocimiento resulta con más notoriedad si nos trasladamos con quienes no están relacionados con alguna de las disciplinas.

El siguiente fragmento sustraído de las cartas de Einstein nos refleja su pensamiento sobre la filosofía como una herramienta relevante para el desarrollo de la ciencia.¹⁴²

Estoy totalmente de acuerdo con usted sobre la importancia y el valor educativo de la metodología, así como de la historia y la filosofía de la ciencia. Muchas personas hoy en día e incluso científicos profesionales parecen como alguien que ha visto miles de árboles, pero que nunca han visto un bosque. El conocimiento de los antecedentes históricos y filosóficos da el tipo de independencia de los prejuicios de su generación de los cuales la mayoría de los científicos padecen. Esta independencia creada por una visión filosófica es -en mi opinión- la marca de distinción entre un simple artesano o especialista y un buscador de la verdad. (Einstein, en una carta a R. A. Thornton, tomado de Rickles, 2008)

La anterior cita nos hace ver la importancia de mostrar la visión filosófica, así como el contexto histórico de la ciencia, para crear un panorama más completo del quehacer científico. En este sentido, esta idea se puede trasladar para el quehacer de la divulgación y la representación de la ciencia que en ella se ofrece.

En la siguiente sección expondremos, de manera introductoria, la relación entre física cuántica y filosofía, pues en el contenido de la presente investigación se presentarán más detalles sobre estos vínculos.



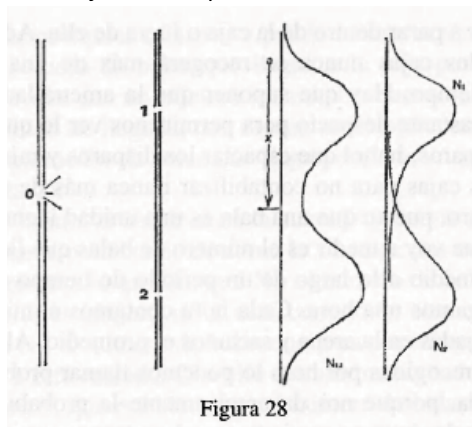
¹⁴² Este fragmento surge a partir de que el físico Robert A. Thornton quiso incorporar la Filosofía de la ciencia dentro de su curso introductorio a la Física, y escribió a Albert Einstein para que le apoyase a persuadir a sus colegas para aceptar esa “innovación”. Estas palabras fueron la respuesta de Einstein. (Howard, 2005)

APÉNDICE C

Experimento de la doble rendija explicado por Richard Feynman¹⁴³

[...] Vayamos, pues, al grano y déjenme describirles el comportamiento típicamente mecánico cuántico de los electrones y fotones. Voy a intentarlo mediante una mezcla de analogía y contraste. Si fuera pura analogía fracasaríamos; tenemos que razonar por analogía y contraste con cosas que nos resulten familiares. Cuando hable de partículas usaré la imagen de las balas, y cuando hable de ondas recurriré a las ondulaciones de la superficie del agua. Lo que voy a hacer es idear un experimento particular y contarles primero qué ocurriría si se usaran partículas, y después qué cabría esperar si se usaran ondas, para acabar explicando lo que ocurre cuando el experimento se hace con electrones o fotones verdaderos. Voy a servirme únicamente de este experimento, que ha sido diseñado para contener todo el misterio de la mecánica cuántica, para enfrentarnos de pleno a las paradojas, los misterios y las peculiaridades de la naturaleza. Cualquier otra situación en mecánica cuántica puede siempre explicarse diciendo: «¿Recuerdas el caso del experimento de los dos agujeros? Pues es lo mismo». Paso, pues, a describir el experimento de los dos agujeros. Ahí está contenido todo el misterio. No intento escamotearles nada; estoy ofreciéndoles la naturaleza en su forma más elegante y difícil.

Empecemos con las balas (figura 28). Supóngase que tenemos una ametralladora que dispara balas a través de un agujero en una plancha blindada. A bastante distancia hay una segunda plancha blindada con dos agujeros. Como voy a referirme constantemente a ellos, los llamaré n.º 1 y n.º 2 (los famosos dos agujeros). Imagínense unos agujeros redondos en tres dimensiones (el dibujo es sólo un corte transversal). De nuevo a bastante distancia situamos una pantalla en la que podemos instalar un detector, que para las balas puede ser una simple caja con arena que nos permita recogerlas y contarlas. Voy a emprender una serie de experimentos en los que quiero contar el número de balas que recoge la caja de arena en distintas posiciones. Llamaré x a la altura de la caja sobre la pantalla.



Quiero describir lo que ocurre cuando se cambia x , es decir, cuando desplazo el detector arriba y abajo. Pero antes quisiera introducir tres idealizaciones. La primera es que la ametralladora está mal sujeta, por lo que baila mucho y las balas salen disparadas en varias direcciones, de manera que algunas pueden rebotar en los bordes de los agujeros de la plancha blindada. En segundo lugar, todas las balas poseen la misma velocidad o energía, aunque esto no es demasiado importante. La tercera idealización, y la más fundamental,

¹⁴³ Cfr. Feynman, R. (2005) *El carácter de la ley física*. Barcelona: Madrid. pp. 144-163

es que las balas son indestructibles, de manera que siempre contaremos balas enteras y no fragmentos de plomo.

Lo primero que quiero subrayar con respecto a las balas es que representan unidades enteras. La energía que llega lo hace en forma de balazos. Si se cuentan las balas, tendremos una, dos, tres, cuatro... siempre unidades enteras. Supondremos que todas las balas son del mismo tamaño y que sólo pueden ir a parar dentro de la caja o fuera de ella. Además, si coloco dos cajas nunca se recogerá más de una bala al mismo tiempo. Hay que suponer que la ametralladora dispara lo bastante despacio para permitirnos ver lo que ocurre entre disparos; habrá que espaciar los disparos y mirar enseguida las cajas para no contabilizar nunca más de una bala por disparo, puesto que una bala es una unidad identificable.

Lo que voy a medir es el número de balas que llegan por término medio a lo largo de un periodo de tiempo determinado, digamos una hora. Cada hora contamos el número de balas alojadas en la arena y sacamos el promedio. Al número de balas recogidas por hora lo podemos llamar probabilidad de que una bala cruce un agujero y se aloje en una caja determinada. El número de balas alojadas en la caja variará, claro está, en función de x . En la figura he representado horizontalmente el número de balas recibidas si mantengo la caja en cada posición durante una hora. De esta manera obtengo una curva parecida a la curva N_{12} , porque cuando la caja está detrás de uno de los agujeros recibe muchas balas, mientras que en otras posiciones recibirá menos balas, porque éstas tendrán que rebotar en los bordes de los agujeros para llegar a la caja, y si la alejo más del centro acabará por no recibir ninguna. Así pues, la curva resultante se parece a N_{12} ; llamaré así al número de balas recibidas en una hora cuando ambos agujeros están abiertos.

Debo recordarles que el número que he representado gráficamente no viene expresado en unidades enteras. Puede tomar cualquier valor. Puede ser dos balas y media hora, a pesar de que las balas son unidades enteras. Lo que esto quiere decir es que si se realiza el experimento durante 10 horas, la caja recibirá 25 balas, o sea, una media de 2,5 balas por hora. Seguro que conoce el chiste sobre la familia media estadounidense que, según parece, tiene dos hijos y medio. Esto no significa que la familia tenga medio hijo: los hijos se tienen enteros. Sin embargo, el promedio por familia puede ser cualquier número, y por la misma razón N_{12} , que es el promedio de balas que llegan a la caja por hora, no tiene por qué ser un número entero. Lo que se mide es la probabilidad de llegada, que es una manera técnica de referirse al promedio de balas que llegan durante un periodo de tiempo dado.

Por último, si analizamos la curva N_{12} vemos que puede interpretarse perfectamente como la suma de dos curvas, una que representa lo que llamaré N_1 , el número de balas que se recogen si el agujero n.º 2 está cerrado, y otra correspondiente a N_2 , el número de balas que pasa por el agujero n.º 2 si el n.º 1 está cerrado. Con ello descubrimos una ley de gran importancia, que establece que el número de balas recogidas cuando ambos agujeros están abiertos es el número que llega a través del agujero n.º 1 más el número que llega a través del agujero n.º 2. A esta ley, que nos dice que sólo tenemos que sumar ambos números, la llamaré de «no interferencia».

$$N_{12} = N_1 + N_2 \text{ (no interferencia).}$$

Esto por lo que respecta a las balas. Ahora vamos a repetir el experimento con ondas (figura 29). La fuente de nuestras ondas será una gran mole que se deja caer al agua y luego se sube. La plancha blindada se convierte en un espigón con un agujero en medio. Bueno, quizá sea más sensato producir pequeñas ondulaciones en vez de grandes olas. Crearé las ondas con el dedo y como barrera pondremos un pedazo de madera con un agujero a través del cual pasan las ondas. A continuación, pondremos una segunda barrera con dos agujeros y por último un detector. ¿Qué hacemos con el detector? Lo que tenemos que medir es la oscilación del agua. Por ejemplo, puedo colocar un pedazo de corcho sobre el agua y medir cómo sube y baja; lo que estoy midiendo en realidad es la energía del movimiento del corcho, que es exactamente proporcional

a la energía de las ondas. Una cosa más: el movimiento debe ser muy regular y perfecto, de manera que las ondas estén igualmente espaciadas. Una cosa importante en este caso es que lo que medimos puede tomar cualquier valor. Estamos midiendo la intensidad de las ondas, o la energía del corcho, y si las ondas son muy tenues, si mi dedo sólo se mueve un poquito, el corcho apenas se balanceará. En cualquier caso, su oscilación será proporcional a la intensidad de las ondas y podrá tener cualquier valor: no vendrá dada en unidades exactas del tipo todo o nada.

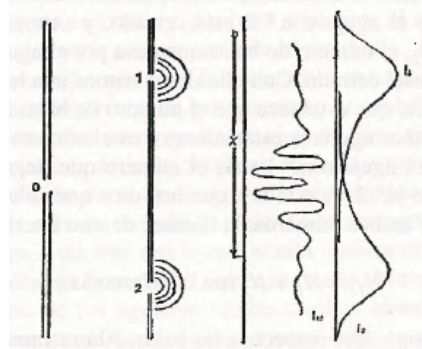


Figura 29

Lo que vamos a medir es la intensidad de las ondas o, para ser exactos, la energía generada por las ondas en un punto. ¿Qué ocurre cuando medimos la intensidad? (Que llamaré I para recordarles que se trata de intensidad y no de un número de partículas.) La curva I_{12} , correspondiente a ambos agujeros abiertos, aparece en la figura 29. Es una curva interesante, de aspecto complicado. Si colocamos el detector en lugares distintos obtenemos una intensidad que varía muy rápidamente de una manera particular. Es probable que ustedes conozcan la razón de este comportamiento. Es porque las ondas tienen crestas y valles que parten del agujero n.º 1 y crestas y valles que parten del agujero n.º 2. Si nos situamos justo en medio, de manera que las ondas procedentes de los dos agujeros lleguen al mismo tiempo, ambas crestas se superpondrán y el agua dará un buen salto. En cambio, si trasladamos mi detector a un punto más alejado del agujero n.º 2 que del n.º 1, las ondas procedentes de 2 tardarán más en llegar que las de 1, de manera que cuando llegue una cresta de 1, la cresta procedente de 2 no habrá llegado todavía; en realidad, de 2 llegará un valle de onda, con lo que el agua tratará de subir y bajar al mismo tiempo debido a la influencia de las ondas procedentes de uno y otro agujero, con el resultado neto de no moverse en absoluto o muy poco. Así que en este sitio apenas notaremos nada. Si continuamos desplazándonos llegará un momento en que el retraso de una de las ondas hará que vuelvan a coincidir dos crestas, aunque haya una oscilación completa de diferencia. Así pues, vamos obteniendo alternativamente un gran salto, uno pequeño, un gran salto, uno pequeño..., según la forma en que las crestas y los valles «interfieran». Una vez más, el término interferencia tiene un uso científico curioso. Podemos tener lo que se llama interferencia constructiva, como cuando ambas ondas generan un gran salto. Lo verdaderamente importante es darse cuenta de que I_{12} no es lo mismo que la suma de I_1 más I_2 , por eso hablamos de interferencia constructiva y destructiva. Podemos averiguar el aspecto de I_1 y de I_2 cerrando primero el agujero n.º 2 y luego el n.º 1. La intensidad que se obtiene si un agujero está cerrado es simplemente el resultado de las ondas que pasan por el otro agujero sin interferencia alguna, y las curvas resultantes están dibujadas en la figura 29. Se observará que I_1 es idéntica a N_1 e I_2 idéntica a N_2 , mientras que I_{12} es muy distinta de N_{12} .

A decir verdad, las matemáticas de la curva I_{12} son muy interesantes. Es cierto que la altura del agua, que llamaremos h , cuando ambos agujeros están abiertos es igual a la altura que obtendríamos con el n.º 1 abierto más la altura del n.º 2 representa un valle, se le dará un valor negativo que anulará la altura del n.º 1. Podemos, pues, establecer dicha relación cuando se trata de la altura del agua, pero resulta que la intensidad en cualquier caso, como cuando ambos agujeros están abiertos, no es igual a la altura, sino proporcional al

cuadrado de la altura. Es porque estamos tratando con cuadrados por lo que obtenemos una curva tan interesante.

$$h_{12} = h_1 + h_2$$

pero,

$$I_{12} \neq I_1 + I_2 \text{ (Interferencia)}$$

$$I_{12} = (h_{12})^2$$

$$I_1 = (h_1)^2$$

$$I_2 = (h_2)^2$$

Dejemos el agua y volvamos a empezar, esta vez con electrones (figura 30).

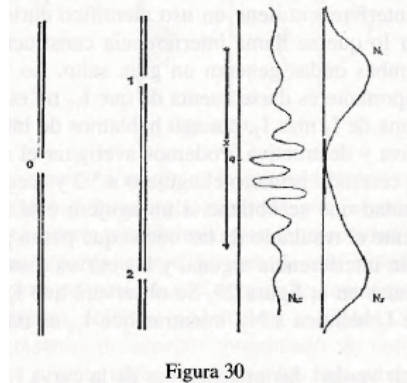


Figura 30

La fuente de electrones es un filamento, las barreras son ahora planchas de tungsteno con los correspondientes agujeros, y como detector utilizamos un sistema eléctrico lo bastante sensible para registrar la carga de cualquier electrón que llegue al aparato, por pequeña que sea la energía de la fuente. También podríamos utilizar fotones y papel negro en vez de electrones y planchas de tungsteno (aunque el papel negro no es muy apropiado, porque las fibras no permiten hacer agujeros de contornos precisos, por lo que habría que buscar algo mejor) y como detector un fotomultiplicador capaz de detectar la llegada de los fotones individuales. ¿Qué ocurre en estos casos? Voy a discutir solamente el experimento con electrones, puesto que el otro daría el mismo resultado.

En primer lugar, lo que registra el detector eléctrico, debidamente amplificado, son clics, unidades enteras. Cuando se oye el clic, la intensidad del sonido es siempre la misma. Si la fuente se debilita, los clics son igual de sonoros, pero más espaciados. Si se aumenta la intensidad de la fuente, los clics se suceden tan deprisa que el amplificador llega a saturarse. Es decir, hay que reducir la intensidad para que el instrumento que se utiliza para detectar la llegada de los electrones pueda funcionar adecuadamente. Hay que señalar también que si se coloca otro detector en un lugar distinto nunca se oirán dos clics al mismo tiempo, al menos si la fuente es lo bastante débil y el instrumento lo bastante preciso. Si se reduce la intensidad de la fuente de manera que los electrones lleguen lo bastante espaciados, nunca sonará simultáneamente un clic en ambos detectores. Esto significa que lo que está llegando se presenta en forma de unidades de magnitud determinada y una detrás de otra. Así pues, los electrones, o los fotones, se dan en unidades; por lo tanto, podemos hacer lo mismo que hicimos en el caso de las balas: medir la probabilidad de llegada. Lo que hacemos es colocar el detector en posiciones distinta (o, si se prefiere, aunque es más caro, podemos colocar una hilera de detectores y trazar la curva de una vez). Mantenemos, pues, el detector en cada posición durante, digamos, una hora, medimos cuántos electrones han llegado y al cabo de varias horas calculamos el promedio. ¿Qué curva obtenemos? La figura 30 nos muestra lo que se obtiene con ambos agujeros abiertos. Lo extraordinario de la naturaleza es que produce una curva idéntica a la obtenida con la interferencia de las

ondas. Y la produce no en el caso de la energía de una onda, sino en el caso de la probabilidad de llegada de unidades enteras.

Las matemáticas son simples. No hay más que cambiar N por I , y h por otra cosa nueva (no se trata de la altura de nada). Nos inventamos una a a la que llamaremos amplitud de probabilidad, porque no sabemos lo que significa. En este caso a_1 es la amplitud de probabilidad de pasar por el agujero n.º 1 y a_2 es la amplitud de probabilidad de pasar por el n.º 2. Para determinar la amplitud de probabilidad total se suman las dos amplitudes parciales y se elevan al cuadrado, a imitación de lo que ocurre con las ondas, porque para hallar la curva equivalente utilizamos las mismas matemáticas.

Nos queda, sin embargo, una cuestión por verificar en relación con la interferencia. No he dicho nada de lo que ocurre cuando se tapa uno de los agujeros. Intentemos analizar esta interesante curva suponiendo que los electrones pasan sólo por un agujero o por otro. Cerramos el segundo y medimos cuántos electrones pasan por el n.º 1, y obtenemos la curva simple N_1 . O bien cerramos el primero y medimos cuántos electrones pasan por el n.º 2, con lo que obtenemos la curva N_2 . Pero la suma de esas dos curvas no da N_{12} ; esto quiere decir que hay interferencia. De hecho, matemáticamente, N_{12} viene expresada por una curiosa fórmula según la cual la probabilidad de llegada es el cuadrado de una amplitud que a su vez es la suma de dos partes: $N_{12} = (a_1 + a_2)^2$. La cuestión es explicar cómo es posible que cuando los electrones pasan a través del agujero n.º 1 estén distribuidos de una manera, que cuando pasan por el agujero n.º 2 lo estén de otra y, sin embargo, cuando ambos agujeros están abiertos no se obtiene la suma de ambas distribuciones. Por ejemplo, si mantengo el detector en el punto q con ambos agujeros abiertos, no obtengo prácticamente nada, mientras que si cierro uno de ellos obtengo muchas señales, y si cierro el otro obtengo algunas. Pero en cuanto abro ambos agujeros no obtengo nada; les permito a los electrones que pasen a través de dos agujeros y no llega ninguno. Fijémonos en el punto central: se puede comprobar que ahí el valor es mayor que la suma de las dos curvas. Alguno de ustedes se creará lo bastante listo para encontrar una justificación de este fenómeno, como que los electrones entran y salen de los agujeros, o hacen algo más complicado, o se parten por la mitad y penetran por ambos agujeros. Sin embargo, nadie ha conseguido dar una explicación satisfactoria, y esto se debe, en última instancia, a la simplicidad de la expresión matemática de las curvas (figura 30).

Voy a resumir diciendo que los electrones llegan en unidades enteras, como partículas, pero la probabilidad de llegada de estas partículas se determina de la misma manera que la intensidad de las ondas. Es en este sentido en el que se dice que los electrones se comportan a veces como partículas y a veces como ondas. Se comportan de dos maneras distintas al mismo tiempo (figura 31).

Esto es todo lo que puede decirse. Podría dar una descripción matemática para hallar la probabilidad de llegada de los electrones bajo cualquier circunstancia y esto, en principio, sería el final de la conferencia; solo que todavía queda por dilucidar una serie de sutilezas relacionadas con el hecho de que la naturaleza se comparte así. Hay un buen número de cosas curiosas que me gustaría discutir, porque no son autoevidentes.

CUADRO		
<i>Balas</i>	<i>Ondas de agua</i>	<i>Electrones (fotones)</i>
En unidades enteras	Cualquier valor	En unidades enteras
Se mide la probabilidad de llegada	Se mide la intensidad de las ondas	Se mide la probabilidad de llegada
$N_{12} = N_1 + N_2$	$I_{12} \neq I_1 + I_2$	$N_{12} \neq N_1 + N_2$
Sin interferencias	Con interferencias	Con interferencias

Figura 31

Para discutir estas sutilezas empezaremos por analizar una proposición que, al tratarse de unidades enteras, debería parecernos razonable. Puesto que lo que se detecta es siempre una unidad, en este caso un

electrón, es obviamente razonable suponer que o bien el electrón pasa por el agujero n.º 1 o bien lo hace por el n.º 2. Parece completamente obvio que, tratándose de una unidad, no puede hacer otra cosa. Llamaré a esta afirmación «proposición A».

Proposición A:

Un electrón o pasa por

el agujero n.º 1

o pasa por el agujero n.º 2.

Ya hemos dicho algo de lo que ocurre con la preposición A. Si fuera cierto que el electrón o pasa por el agujero n.º 1 o pasa por el n.º 2, el número total detectado tendría que ser la suma de ambas contribuciones. El número total detectado sería igual al número de electrones que pasaran por 1 más el número de electrones que pasarán por 2. Pero, puesto que la curva resultante no puede describirse de una manera tan fácil como la suma de dos componentes, y puesto que los experimentos que determinan el número de electrones llegados si sólo se abre un agujero no indican que el total sea la suma de las dos partes, parece claro que la proposición es falsa. Si no es cierto que el electrón pasa o por un agujero o por el otro, quizá sea porque temporalmente se divide o por alguna otra razón. La proposición A es falsa por lógica. Por desgracia, o por suerte, la lógica puede verificarse experimentalmente. Habrá que comprobar si los electrones pasan o por un agujero o por el otro o si, por el contrario, dan la vuelta por ambos agujeros, o se parten por la mitad, o alguna otra cosa.

Todo lo que hay que hacer es observarlos; y para observarlos necesitamos luz, así que detrás de los agujeros colocamos una fuente de luz intensa. La luz es dispersada por los electrones que chocan con ella, de manera que podremos verlos pasar si la luz es lo bastante intensa. Así pues, nos colocamos en nuestros puestos, dispuestos a ver si cada vez que contamos un electrón, o en el instante anterior, vemos un destello en el agujero 1 o en el 2, o quizás una especie de medio destello en cada agujero. Por fin, con sólo mirar, vamos a descubrir qué pasa. Encendemos la luz, miramos y ¡ahí está!, cada vez que el detector recibe un electrón vemos un destello o en el agujero n.º 1 o en el n.º 2. Lo que vemos es que todas las veces el electrón pasa entero por uno de los agujeros. ¡Paradoja!

Vamos a ver si ponemos a la naturaleza en un aprieto. Les voy a decir lo que vamos a hacer. Vamos a dejar la luz encendida y vamos a contar cuántos electrones pasa. Haremos dos columnas, una para el agujero n.º 1 y otra para el n.º 2, y cada vez que llegue un electrón al detector lo anotaremos en la columna correspondiente al agujero por donde ha pasado. ¿Cómo se ve la columna del agujero n.º 1 tras sumar todas las observaciones para las distintas posiciones del detector? Vemos la curva N_1 (figura 30). Esta columna muestra una distribución igual a la que obtenemos cuando tapamos el agujero n.º 2, con independencia de si miramos o no. Es decir, que si tapamos el agujero n.º 2 obtenemos la misma distribución de llegadas que cuando miramos el agujero n.º 1. Igualmente, el número de electrones que han pasado por el n.º 2 genera la curva simple N_2 . Fijémonos bien, el número total de electrones llegados *tiene que ser* igual al número total. Tiene que ser igual a la suma de N_1 más N_2 , puesto que cada electrón detectado ha sido asignado o bien a la columna 1 o bien a la 2. El número total de electrones detectados *tiene que ser absolutamente* igual a la suma de estos dos. Tiene que distribuirse como $N_1 + N_2$. ¿Pero no dijimos que se distribuía como la curva N_{12} ? Pues no, se distribuye como $N_1 + N_2$. Realmente es así; tiene que ser así y es así. Si señalamos con una prima los resultados obtenidos con la luz encendida, tenemos que N'_1 es prácticamente idéntica a N_1 sin la luz, y N'_2 es casi igual a N_2 . Pero el número N'_{12} , que se obtiene con la luz encendida y ambos agujeros abiertos, es *igual* al número de electrones que pasan por 1 más el número de los que pasan por 2. Éste es el resultado obtenido con la luz encendida. Es decir, que obtenemos un resultado distinto según que la luz esté encendida o apagada. En el primer caso, la distribución es la curva $N_1 + N_2$. Si apagamos la luz, la distribución es N_{12} .

Encendemos la luz de nuevo y otra vez es $N_1 + N_2$. ¡Pues vaya, la naturaleza ha escapado del aprieto! Habrá que concluir que la luz afecta al resultado. Podemos afirmar, por lo tanto, que la luz afecta al comportamiento de los electrones. Si se nos permite hablar de movimiento de los electrones a lo largo del experimento, lo cual es algo impreciso, podremos decir que la luz afecta al movimiento, de forma que los electrones que debían llegar a la zona de máxima densidad son de algún manera desviados o golpeados por la luz, lo que suaviza la distribución hasta dar lugar a la curva simple $N_1 + N_2$.

Los electrones son muy delicados. Cuando observamos una pelota de tenis y le enfocamos una luz, la pelota no se desvía de su camino. Pero cuando enfocamos una luz sobre un electrón, éste es golpeado y su comportamiento se altera. Supóngase que probamos a reducir la intensidad de la luz hasta que es apenas perceptible y utilizamos unos detectores muy sensibles que pueden captar una luz muy tenue. Cabe esperar que una luz muy débil no afecte al electrón tanto como para cambiar el resultado de N_{12} a $N_1 + N_2$. Cabe esperar que al debilitarse la luz nos acerquemos de alguna manera al caso de ausencia de luz. ¿Cómo se transforma una curva en la otra? Pero ahora no estamos tratando con una onda sobre el agua. La luz tiene características de partícula, denominada fotón, y a medida que se reduce la intensidad de la luz no se va eliminando su efecto; lo que hacemos es reducir el número de fotones que salen de la fuente de luz. A medida que reduzco la luz se emiten cada vez menos fotones. La cantidad mínima de luz que puede dispersar un electrón es un fotón, y si se emiten tan pocos fotones puede ocurrir que de vez en cuando se cuele un electrón cuando no pasa ningún fotón, en cuyo caso no lo veré. Por lo tanto, una luz muy tenue no significa una perturbación pequeña, sólo significa pocos fotones. El resultado es que tendré que incluir una tercera columna que diga «no vistos». Cuando la luz es muy intensa, esta columna estará casi vacía, pero cuando la luz sea débil la mayor parte de los electrones irán a parar ahí. De manera que tenemos tres columnas: agujero n.º 1, agujero n.º 2 y no vistos. Ya pueden imaginarse lo que ocurre. Los electrones vistos se distribuyen según la curva $N_1 + N_2$. Los no vistos se distribuyen según la curva N_{12} . A medida que reduzco la intensidad de luz veo cada vez menos electrones y pasan más sin ser vistos. En cualquier caso, la curva verdadera es una mezcla de las dos curvas, de forma que a medida que la luz se debilita se va pareciendo más y más a N_{12} de manera continua.

No puedo explicar ahora las muchas maneras distintas que hay de descubrir el agujero por el que pasó el electrón. Pero siempre resulta que es imposible colocar la luz de tal forma que sea posible observar por qué agujero pasa cada electrón sin perturbar la distribución de los electrones que llegan, sin destruir la interferencia. Y no sólo en el caso de la luz; cualquier otro sistema de detección dará el mismo resultado. Pueden ustedes inventar mil y una maneras de detectar por qué agujero pasa cada electrón, pero si consiguen construir un instrumento tal que no perturbe el movimiento del electrón, entonces ya no será posible saber por qué agujeros pasan los electrones y se obtiene una vez más la curva complicada.

Heisenberg, uno de los padres de la mecánica cuántica, observó que las nuevas leyes de la naturaleza que acababa de descubrir sólo podían ser mutuamente consistentes si existía algún tipo de limitación básica en nuestras capacidades experimentales que no había sido previamente reconocida. En otras palabras, los procedimientos experimentales no pueden ser tan precisos como se quiera. Éste es el principio de incertidumbre de Heisenberg, que expresado en términos de nuestro experimento dice lo siguiente (él formuló de otra manera, pero ambas son equivalentes y es posible pasar de una formulación a otra): «Es imposible construir un aparato que pueda determinar el agujero por el que pasa un electrón sin al mismo tiempo perturbar al electrón lo suficiente para destruir el patrón de interferencia». Nadie ha conseguido escapar a esta ley. Estoy seguro de que todos ustedes están ya pensando en maneras de detectar el agujero por el que pasó el electrón, pero si se analiza cada una de ellas acabaremos descubriendo que inevitablemente algo falla. Uno puede creer que ha conseguido no perturbar al electrón pero siempre pasa algo y siempre pueden explicarse los alejamientos del patrón de interferencia por la perturbación causada por los instrumentos usados para determinar el camino seguido por el electrón.

Ésta es una característica básica de la naturaleza, extensiva a todos los casos posibles. Si mañana se descubre una nueva partícula, digamos el kaón (en realidad esta partícula ya ha sido descubierta, pero la llamaré así de todas maneras), y empleo kaones para determinar el agujero por el que pasa cada electrón, ya sé lo suficiente de entrada (al menos así lo espero) a propósito del comportamiento de cualquier nueva partícula para decir que no puede permitirme decir por qué agujero pasa cada electrón sin que al mismo tiempo perturbe sus trayectorias y transforme el patrón de interferencia en uno de no interferencia. Así pues, el principio de incertidumbre puede aplicarse de forma general para anticipar muchos de los comportamientos de objetos desconocidos, cuyas probables características deben ocurrir entre ciertos límites.

Volvamos a la proposición A: «Los electrones deben pasar o por un agujero o por el otro». ¿Es verdad o no? Los físicos suelen eludir los escollos construyendo sus reglas de razonamiento de la siguiente manera: si poseemos un aparato capaz de indicarnos el agujero por el que pasa un electrón (y *es posible* tener tal aparato), podemos decir que pasa o por un agujero o por el otro. En efecto, un electrón siempre para por uno de los dos agujeros (cuando miramos). Pero cuando no poseemos aparato alguno para determinar por qué agujero ha pasado el electrón, no podemos decir que ha pasado por uno de los dos agujeros. (Bueno, sí se puede *decir*, siempre y cuando no deduzcamos nada de ello; los físicos prefieren no decirlo a tener que dejar de pensar.) Concluir que un electrón ha pasado por uno de los dos agujeros cuando no estamos mirando implica incurrir en un error de predicción. Ésta es la cuerda lógica sobre la que hay que andar si queremos interpretar la naturaleza.

La proposición a la que me estoy refiriendo es de carácter general. No es sólo válida para el experimento de los dos agujeros, sino que puede generalizarse de la siguiente manera. La probabilidad de cualquier suceso en un experimento ideal (es decir, un experimento en el que todo esté tan bien especificado como sea posible) es el cuadrado de algo que he llamado a , la amplitud de probabilidad. Cuando un suceso tiene diversas alternativas, su amplitud de probabilidad es la suma de las a para cada una de las alternativas. Si se efectúa un experimento capaz de determinar la alternativa seguida, la probabilidad del suceso se convierte en la suma de las probabilidades de cada alternativa. Es decir, se pierde la interferencia.

La cuestión ahora es: ¿qué mecanismo subyace tras todo esto? Nadie lo conoce. Nadie puede dar una explicación del fenómeno más profunda que la que acabo de ofrecer: una mera descripción. Quizá pueda darse una explicación más detallada, en el sentido de poner más ejemplos para mostrar que es imposible averiguar por dónde pasa el electrón sin destruir la interferencia. Pueden elegirse experimentos más complicados que el de los dos agujeros. Pero la explicación sólo será más extensa, no más profunda. La formulación matemática puede hacerse más rigurosa; se puede precisar que los números implicados son complejos y no reales, más un par de puntualizaciones secundarias que nada tienen que ver con la idea principal. Pero el misterio profundo es el que acabo de descubrir y, hoy por hoy, nadie puede ahondar más.

Lo que hemos calculado hasta ahora es la probabilidad de llegada de un electrón. Cabe preguntarse si hay alguna manera de averiguar en qué punto concreto incidirá un electrón individual. Por supuesto, no estamos en contra del cálculo de probabilidades cuando la situación es muy complicada. Cuando lanzamos un dado, y puesto que habría que tener en cuenta un sinnúmero de complicaciones, estamos dispuestos a admitir que no sabemos lo suficiente para hacer una predicción exacta; por ello calculamos las probabilidades de que salga una cara u otra. Pero lo que nos estamos preguntando ahora es si no habrá probabilidades hasta en lo más profundo, si las leyes fundamentales de la física son de carácter probabilístico.

Supongamos que tengo un experimento dispuesto de tal forma que con la luz apagada obtengo un patrón de interferencia. Lo que digo es que ni siquiera con la luz encendida puedo predecir por qué agujero pasará un electrón. Sólo sé que cada vez que miro pasa por uno de los agujeros, pero no hay manera de anticipar por cuál de ellos va a pasar. En otras palabras, el futuro es impredecible. Es imposible predecir, a partir de cualquier información previa, por qué agujero pasará o lo veremos pasar. Esto significa que, en cierto

sentido, la física ha tirado la toalla, si es que su propósito original era (y todo el mundo lo creía así) saber lo suficiente para, dadas las circunstancias, poder predecir lo que ocurriría a continuación. Éstas son las circunstancias: una fuente de electrones, una poderosa fuente de luz, un plancha de tungsteno con dos agujeros. ¿Por cuál de los dos agujeros verá pasar el electrón? Una teoría afirma que la razón por la cual no es posible hacer una predicción de esta clase es que la trayectoria está determinada por una serie de cosas muy complicadas: haría falta conocer los engranajes internos del aparato que dispara los electrones, etc. La probabilidad es del 50 por ciento porque, al igual que ocurre con un dado, el resultado es aleatorio. La física es incompleta, pero si algún día llegamos a tener una física lo bastante completa seremos capaces de predecir por qué agujero pasará el electrón. Ésta es la llamada teoría de variables ocultas. Pero tal teoría no puede ser cierta; no es la falta de información detallada lo que nos impide hacer predicciones.

He dicho que si no encendemos la luz obtenemos el patrón de interferencia. Es imposible analizar este experimento en términos de que cada electrón pasa por uno de los dos agujeros, porque la curva de interferencia es muy simple y, desde el punto de vista matemático, completamente distinta de la contribución conjunta de las otras dos curvas probabilísticas. Si hubiéramos podido determinar por anticipado el agujero por el que iba a pasar un electrón, el tener o no encendida la luz sería irrelevante para el resultado final. Fuera cual fuera el mecanismo de la fuente de electrones que nos permitiera anticipar la trayectoria del electrón, podríamos haberla conocido sin encender la luz y, en consecuencia, habríamos podido decir, aun sin luz, por qué agujero iba a pasar el electrón. Pero de haber sido esto posible, la curva resultante habría podido representarse como la suma de los electrones que pasan por agujero n.º 1 más los que pasan por el n.º 2, en contra de lo que realmente ocurre. Es, pues, imposible, ni con luz ni sin ella, disponer de información anticipada que nos indique por qué agujero pasará el electrón cuando el experimento está montado de manera que con la luz apagada se obtiene el patrón de interferencia. No es nuestra ignorancia de los mecanismos internos y sus innumerables complicaciones lo que hace que la naturaleza parezca tener carácter probabilístico. Parece ser algo intrínseco a ella. Alguien lo ha expresado así: «Ni siquiera la propia naturaleza sabe qué camino va a escoger el electrón».

Una vez un filósofo dijo: «Para la existencia misma de la ciencia es necesario que las mismas condiciones den siempre los mismos resultados». Bueno, pues las mismas condiciones no siempre dan los mismos resultados. Se dispone todo cada vez para que se mantengan las mismas condiciones y, sin embargo, resulta imposible predecir por dónde pasará el electrón. A pesar de esto, continuamos haciendo ciencia. Pero el que no podamos predecir exactamente lo que va a ocurrir nos tiene bastante descontentos. En relación con esto, cabría imaginar ciertas circunstancias muy peligrosas en las que *tuviéramos* que saber y, sin embargo, no pudiéramos hacer una predicción exacta. Por ejemplo, podríamos tener que decidir (esperemos que no) que el electrón pasa por el primer agujero debemos hacer explotar una bomba atómica e iniciar la tercera guerra mundial, mientras que si pasa por el primer agujero continuamos negociando y retrasamos un poco la guerra. En estas circunstancias, el futuro de la humanidad dependería de algo que la ciencia no puede predecir. El futuro es impredecible.

Ni lo que es necesario «para la existencia misma de la ciencia» ni las características de la naturaleza pueden determinarse mediante pomposas precondiciones. Estas cosas están determinadas por el material con el que trabajamos, por la propia naturaleza. Observamos y examinamos lo que descubrimos, pero no podemos predecir sin riesgo a equivocarnos. Las posibilidades más razonables a menudo resultan ser falsas. Si la ciencia tiene que progresar, lo que necesitamos es capacidad experimental, honestidad en la publicación de los resultados (que deben darse a conocer sin que nadie nos diga cuáles debieran haber sido) y, por último, inteligencia para interpretarlos. Una cuestión importante con respecto a la inteligencia es que no conviene estar seguros por anticipado de lo que se espera encontrar. La inteligencia puede estar cargada de prejuicios: «Esto es poco probable, esto no me gusta». Pero el prejuicio es distinto de la certeza absoluta. No me refiero a las preferencias personales, sino al prejuicio absoluto. Si se trata sólo de preferencias no hay cuidado

porque, de estar equivocados, la acumulación de resultados en contra acabará obligándonos a transigir. Sólo es posible ignorarlos si estamos absolutamente convencidos de que la ciencia exige ciertas precondiciones. En realidad, para la existencia misma de la ciencia es necesario que existan cabezas que no acepten que la naturaleza deba cumplir ciertas condiciones preconcebidas, como las de nuestro filósofo.



APÉNDICE D

Cuadro comparativo entre interpretaciones realistas e interpretaciones instrumentalistas para la física cuántica

Algo que se ha señalado reiteradamente a lo largo de la tesis es que uno de los debates fundamentales de la física cuántica se ha dado en torno a la interpretación de ella. A pesar de que la teoría cuántica resulta ser “la teoría más útil y poderosa que se ha desarrollado en la física, el desacuerdo sobre el significado de la teoría es más fuerte que nunca. Nuevas interpretaciones aparecen todos los días [y] ninguna desaparece nunca”. (Mermin, 2012. En: Cabello, 2017)

Es precisamente este tema el que muy pocas veces es desarrollado en las publicaciones de divulgación y en este sentido, es más inusual que se hable de las variantes interpretativas de la teoría, tal situación se observó en la serie de publicaciones que se analizaron en la tesis. Como ya hemos mencionado en otras secciones, el contenido de divulgación que se presenta en las publicaciones se caracteriza por mostrar la teoría a partir de la *Interpretación de Copenhague* o *Interpretación ortodoxa*, dejando de lado los cuestionamientos que están implicados en ella.

En este apartado se mostrarán, de manera esquemática, las distinciones e implicaciones que surgen al adoptar ciertas interpretaciones, las cuales se han de edificar sobre la aceptación de ciertos supuestos filosóficos. Con ello se propone una herramienta de consulta para abordar las divergencias interpretativas dentro de la física cuántica en los productos de divulgación.

Antes de presentar el esquema debemos recordar que cuando hablamos de la interpretación de la teoría nos referimos al significado que se le da a la teoría y a su formalismo matemático, es decir, qué nos dice la teoría acerca del mundo¹⁴⁴. Es relevante

¹⁴⁴ Cabe destacar que al aceptar que las teorías científicas nos dan explicaciones sobre el mundo externo a nosotros, implícitamente se está adoptando una postura realista. Sin embargo, también es importante señalar que esta afirmación

advertir que cualquier interpretación conlleva la aceptación de ciertos supuestos sobre la realidad; uno de ellos es afirmar que existe una realidad independiente del observador o del sujeto que conoce y, en este sentido, las teorías nos permiten describir esa realidad y además, nos permiten predecir fenómenos. Si aceptamos lo anterior estaremos posicionándonos sobre una concepción realista de la ciencia, o bien, reconociendo el realismo científico. Por otro lado, si estamos convencidos de que las teorías científicas solamente son herramientas que nos permiten dar predicciones de los fenómenos a partir del conocimiento de ciertas condiciones iniciales, sin considerar que estamos describiendo la realidad, entonces estamos adoptando una postura instrumentalista. Ambas caracterizaciones que hemos dado, del realismo e instrumentalismo, son muy generales pero a la vez son funcionales para nuestros propósitos; en este aspecto, es importante señalar que al ahondar más en ellas encontraremos que su significado e implicaciones han provocado discusiones y estudios profundos dentro de la filosofía de la ciencia.

Estas dos posiciones, la realista y la instrumentalista, las encontramos cuando indagamos en el tema de las interpretaciones de la física cuántica, es decir, son posturas filosóficas que subyacen en ellas. Podríamos decir que ambas se encuentran en los polos opuestos de la gama de interpretaciones que se han propuesto a lo largo de la historia de la cuántica. Teniendo en cuenta lo anterior, describiremos ambas posturas a partir de sus características generales y las resoluciones que nos dan a ciertas preguntas básicas que surgen cuando se busca dar una interpretación a la teoría. Al señalar que existe una gama o variedad de interpretaciones de la teoría estamos aludiendo a que esa variedad se encuentra en medio de los dos polos que hemos señalado, habrá algunas que tienen una mayor inclinación hacia una u otra postura, aquí solamente mencionaremos algunas¹⁴⁵.

resulta muy general pues si llegáramos a profundizar en el concepto, nos encontraríamos con discusiones más amplias dentro de la filosofía de la ciencia.

¹⁴⁵ La siguiente esquematización está basada en la revisión de la siguiente bibliografía: Chakravartty, A. (2007). *A Metaphysics for Scientific Realism. Knowing the Unobservable*. / Chakravartty, A. (2016). *Scientific Realism*. / Cushing, J. T. (2003). *Philosophical Concepts in Physics. The historical relation between philosophy and scientific theories*. / Albert, D. Z. (1994). *Quantum Mechanics and Experience*. / De la Peña, L. (2012). *Introducción a la mecánica cuántica* / (Sus, A. (2017) *Mecánica cuántica: interpretación y divulgación*.

	Realismo Las teorías científicas describen correctamente los observables y no observables de la realidad independientemente a nosotros o al sujeto que investiga. (Chakravartty, 2007; 2016)	Instrumentalismo Las teorías solamente son instrumentos para predecir fenómenos observables o sistematizar informes de observación. (Chakravartty, 2016)
Características principales	<p>La postura realista prevalece en la física clásica, y también, podría decirse que, en todas las ciencias.</p>	<p>La postura instrumentalista tiene su origen en el idealismo subjetivo, se asocia a la corriente filosófica del positivismo lógico, y después al empirismo lógico, en las que se establece que las afirmaciones sobre los no observables son significativas, solamente, cuando los términos que refieren a ellos se vinculen de manera apropiada a observables, esto es, que las afirmaciones de los no observables implícitamente refieran a observables. Es común que el instrumentalismo sea identificado con otras corrientes del pensamiento por compartir algunas premisas. Estas corrientes son: positivismo, pragmatismo, operacionalismo, antirrealismo, empirismo. (Chakravartty, 2007, p. 11)</p>
	<ul style="list-style-type: none"> • Supone una realidad independiente del sujeto (supuesto metafísico). • Interpreta las teorías literalmente o al pie de la letra (supuesto semántico). 	<ul style="list-style-type: none"> • El significado de las teorías se reduce a cualquier implicación que se tenga en relación con los observables. Duhem señaló que “las teorías no eran capaces de penetrar en la constitución real de la naturaleza” (supuesto metafísico).

	<ul style="list-style-type: none"> Las teorías nos proporcionan el conocimiento de observables y no observables (supuesto epistemológico). (Chakravartty, 2016) 	<ul style="list-style-type: none"> Las afirmaciones sobre objetos no observables no tienen un significado literal, solamente adquieren significado al asociarse con términos para observables (supuesto semántico). Las teorías solamente proporcionan conocimiento a partir de observables. Enfatizan en la experiencia como fuente de conocimiento (supuesto epistemológico). (Chakravartty, 2016)
	Las predicciones derivadas de las teorías, en este caso de la mecánica cuántica, proporcionan descripciones que se aproximan a la realidad subyacente.	La mecánica cuántica se debe considerar como un algoritmo u herramienta para efectuar predicciones de los experimentos, sin la suposición de que ella describe la realidad subyacente.

Preguntas fundamentales hacía la física cuántica que han causado controversias:

¿Hay algo en la realidad que se corresponda con la función de onda (ψ) ?	Sí	No
¿Qué significado debe atribuirse a la función de onda (ψ) o al estado del sistema cuántico?	ψ describe el estado de un sistema que existe independientemente de nosotros y de nuestro conocimiento sobre él (descripción objetiva). (De la Peña, 2012)	ψ describe el estado de un sistema que depende de los datos observacionales que podemos obtener, a ellos se les puede conceder o no su existencia independiente de nosotros. “Las observaciones son las que definen el estado del sistema”.
	Interpretación estadística o de ensemble: La función onda (ψ) determina las propiedades estadísticas de un ensemble de sistemas igualmente preparados. (de la Peña, 2012)	Interpretación de Copenhague: La función de onda nos proporciona un catálogo de probabilidades de los valores posibles (distribución de probabilidad) para las propiedades que se estén midiendo (posición, energía, momento).

<p>Dualidad en la naturaleza de las partículas cuánticas (onda-partícula).</p>	<p>Interpretación estadística o de ensemble:</p> <p>El comportamiento de las partículas cuánticas se considera como uno distinto a lo que se observa en la física clásica.</p>	<p>Interpretación de Copenhague:</p> <p>La naturaleza dual de la materia se considera como si las partículas fueran un ente dual y complementario, que se manifiesta en una u otra forma, de manera mutuamente excluyente, dependiendo de la situación. (De la Peña, 2012)</p>
<p>Imposibilidad de asignar de manera simultánea valores bien definidos a conjuntos de propiedades.</p> <p>Naturaleza imprevisible del comportamiento de las partículas.</p> <p>(característica indeterminista en los sistemas cuánticos).</p>	<p>Interpretación estadística o de ensemble:</p> <p>“No afirma ni implica nada al respecto, por lo que en ella coexisten la corriente acausal y, mucho menos frecuente, la causal que considera que el comportamiento indeterminista de las partículas es el resultado de la acción de algún factor externo [...] Sostiene que las reglas fundamentales de la física son deterministas, en este sentido, aún no se conoce la causa del indeterminismo cuántico”. (De la Peña, 2012)</p> <p>La indeterminación no es una propiedad ontológica, sino un principio de dispersión estadística. Se requiere más investigación al respecto.</p> <p>Interpretación bohmiana: Apoyada en las características de la ecuación de Schrödinger, afirma que un sistema cuántico aislado evoluciona de un modo totalmente determinista.</p>	<p>Interpretación de Copenhague:</p> <p>“Se trata de un fenómeno irreducible a términos más elementales, inanalizable y, por lo tanto, acausal; las partículas se comportan así <i>per se</i>, el indeterminismo es la forma de ser del electrón.</p> <p>El indeterminismo llega a ser considerado como un principio para la teoría. Este indeterminismo esencial e irreducible se da en el plano empírico en algunos autores, pero ontológico para otros.</p> <p>Se rehúsa a investigar más a fondo.</p>
<p>¿Qué papel juega el observador en la medición?</p>	<p>Al asumir una postura realista se busca que la descripción del mundo dada por la teoría se considere independiente del observador.</p>	<p>Al asumir una postura instrumentalista, no es posible dar una interpretación realista, pues se advierte que el observador cumple una función notable en el proceso de medición.</p> <p>Interpretación de Copenhague: “El sistema observado y el observador son inseparables en la escala atómica”.</p>

<p>Aceptación del colapso de la función de onda (ψ)</p>	<p>Buscan dar cuenta de ello</p>	<p>Interpretación de Copenhague: El colapso de la función de onda se impone como un postulado en la teoría, ese “fenómeno” radicaría en la interacción entre el sistema y el acto de medir. Al asumir el colapso, se dice que la descripción del estado de un sistema individual está completa.</p>
<p>Subjetividad en las interpretaciones de la función de onda (ψ)</p>	<p>Subjetivismo en el realismo:</p> <p>ψ no representa algo del sistema físico, sino algo relacionado con nuestro conocimiento del sistema. “La teoría cuántica no se refiere a la naturaleza, sino a nuestros conocimientos sobre ella” (Heisenberg, 1951; De la Peña, 2012)</p>	<p>Subjetivismo en el instrumentalismo:</p> <p>ψ refiere sólo a propiedades de los datos observacionales; tales datos varían según nuestras observaciones. En última instancia, las observaciones definen el estado del sistema. (De la Peña, 2012)</p> <p>Algunos de los seguidores de la Interpretación de Copenhague atribuyeron el colapso de la función de onda durante el proceso de medición a una intervención intrínseca de la mente o conciencia del observador. (von Neumann, 1955; J. Wheeler, 1978; E. Wigner, 1964)</p>
<p>¿Se considera completa la descripción actual de la mecánica cuántica?</p>	<p>No.</p> <p>Hay elementos de la naturaleza que aún no se han conocido y la teoría no da cuenta de ellos. (Postura adoptada en EPR)</p> <p>“Estoy firmemente convencido de que el carácter esencialmente estadístico de la teoría cuántica contemporánea se debe atribuir al hecho de que esta (teoría) opera con una descripción incompleta de los sistemas físicos”. Einstein.</p> <p>Interpretación estadística o de ensemble: La función de onda (ψ) describe sólo ciertas propiedades estadísticas de un conjunto de sistemas que fueron preparados de un modo similar. Max Born (1955)</p>	<p>Sí.</p> <p>La pregunta carece de sentido. (Postura adoptada por los partidarios de la Interpretación de Copenhague)</p> <p>Interpretación de Copenhague: La función de onda (ψ) ofrece una descripción completa las características de un sistema individual. (De la Peña, 2012)</p>

fue el primero en indicar que la función de onda no refiere a un sistema individual, sino a un resultado estadístico de una serie de experimentos.

Desigualdades de Bell

En 1964 Bell probó que una teoría cuántica realista (todos los observables tienen una existencia independiente del observador para todo tiempo) y local (no admite interrelaciones instantáneas entre regiones espacialmente distantes) no puede reproducir todas las predicciones de la mecánica cuántica (Bell 1964, Bell 1966). Como las desigualdades de Bell fueron empíricamente confirmadas -primero por Aspect (Aspect, Dalibard y Roger 1982, Aspect 1999, Aspect 2007) y más recientemente por Hensen (Hensen et al. 2015)- cualquier teoría cuántica que se ajuste a la experiencia debe contradecir la realidad objetiva o la localidad o ambas.

Otras interpretaciones:

- **Interpretación de muchos mundos (realista)**

Basada en la propuesta de Hugh Everett (1957): pretende dar una interpretación lo más literal posible del formalismo cuántico, según la cual la superposición de estados debe entenderse en términos de una multiplicidad de mundos. En este sentido, “la función de onda del universo” representa una multiplicidad de realidades o mundos. Everett propuso un modelo matemático para describir la interacción entre cada observador y el sistema físico observado. En cada observación, el estado del observador se ramifica en una serie de estados diferentes, donde cada rama corresponde a un resultado distinto de la medición y al correspondiente estado del sistema físico. No existe el colapso. “La función evoluciona, siempre y en todas partes, siguiendo la ecuación de Schrödinger, sólo que no vemos más que una pequeña parte de la enorme función de onda del universo [...] elimina el misterioso colapso, pero al precio de que la función de onda se expanda de forma exponencial”. (Orzel, 2010)

- **Interpretación Bohmiana (realista)**

Interpretación que sigue el mismo formalismo que la Interpretación de Copenhague. Los sistemas evolucionan de manera determinista. En ella, las partículas están guiadas por la función de onda (ψ), considerada, esta última, como un campo físico real. Asimismo, la función de onda (ψ) representa el efecto del entorno en un sistema dado. Con esta interpretación las partículas guiadas por una onda piloto siguen una trayectoria específica y bien definida. La ubicación específica no se predice ni se controla, sino que responde a una distribución estadística de acuerdo con la densidad de probabilidad. Las relaciones de incertidumbre de Heisenberg se vuelven limitaciones en la precisión de nuestras mediciones debido a los efectos del potencial cuántico. De acuerdo a Bohm (1952), “el uso de estadísticas no es inherente a la estructura conceptual, sino simplemente una consecuencia de nuestra ignorancia de las condiciones iniciales precisas de la partícula”.

En esta interpretación, se acepta la no-localidad, o como lo llamó Einstein, “una fantasmagórica acción a distancia”, sugiriendo un aparente conflicto con la relatividad especial. No hay colapso de la función de onda tras la observación, simplemente se descubre dónde está la partícula. (Albert, 1994; Cushing, 2003; Sus, A., 2017)

- **Interpretación del QBism (Bayesianismo cuántico)**

De acuerdo con Christopher Fuchs, quien propone esta interpretación, la propuesta se basa en un “realismo participativo”, en el que la función de onda consiste en una herramienta utilizada por el observador para asignar valores a las propiedades de un sistema. Es decir, los estados cuánticos no representan realidades independientes, sino que ellos dependen del sujeto. En este sentido, en la mecánica cuántica se implican las experiencias de quien utiliza la teoría. Las probabilidades de un evento son asignadas por un agente y son propias de él. Así, el colapso de la función de onda sólo representaría la “elección” de las probabilidades asignadas por el agente observador para dar cuenta de sus expectativas (colapso subjetivo).

Consecuencias para la divulgación

Una de las consecuencias en la divulgación de asumir una postura realista, sería que la interpretación de la teoría esté forzada a encajar con nuestras intuiciones, lo cual podría provocar que se desvirtúe su comunicación al público.
(Sus, A. 2017)

Una de las consecuencias en la divulgación de asumir una postura instrumentalista sería dejar de lado los debates fundamentales de la teoría y dejar la puerta abierta a confusiones o interpretaciones arbitrarias en el público.
(Sus, A. 2017)



BIBLIOGRAFÍA

- Aaserud, F. (2007). *NIELS BOHR Collected Works Volume 12 Popularization and people (1911-1962)*.
- Abbagnano, N. (2012). Física. *Diccionario de Filosofía*. México: FCE.
- Abbot, P. (2002). *The Cambridge Introduction to Narrative*. Cambridge University Press.
- Albert, D. Z. (1994). *Quantum Mechanics and Experience*. Cambridge: Harvard University Press.
- Allahverdyan, A., Balian, R., Nieuwenhuizen, T. (2013). Understanding quantum measurement from the solution of dynamical models. *Physics Reports*, 1–201.
- Arana, J. (2001). Introducción. En *Schrödinger. La nueva mecánica ondulatoria y otros escritos* (pp. 13–43). Madrid: Biblioteca Nueva.
- Aristóteles. (2005). *Física*. México: UNAM.
- Aristóteles. (2013). *Poética*. Madrid: Alianza Editorial.
- Aronowitz, S. (1988). *Science as Power: Discourse as Ideology in Modern Society*. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Bacciagaluppi, G., & Valentini, A. (2013). *Quantum Theory at the Crossroads. Reconsidering the 1927 Solvay Conference*. (1st.). New York: Cambridge University Press.
- Bauer, M. W., Allum, N., & Miller, S. (2007). What can we learn from 25 years of PUS survey research? : liberating and expanding the agenda, *16*(2007), 79–95. <https://doi.org/10.1177/0963662506071287>
- Beller, M., Fine, A. (1994). Bohr's response to EPR. En H. Faye, J. & Folse (Ed.), *Niels Bohr and Contemporary Philosophy* (pp. 1–27). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Beller, M. (1996). The Rhetoric of Antirealism and the Copenhagen Spirit. *Philosophy of Science*. <https://doi.org/10.1086/289908>
- Beller, M. (1998). The Sokal Hoax: At Whom Are We Laughing? *Physics Today*, (September), 29–34.
- Beller, M. (1999). *Quantum Dialogue. The Making of a revolution*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Bensaude-Vincent, B. (2003). In the Name of Science. En D. Krige, J. & Pestre (Ed.), *Companion to Science in the Twentieth Century*. London: Routledge.
- Black, M. (1982). More about metaphor. En *Metaphor and Thought*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bogen, J. (2014). Theory and Observation in Science. En *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Recuperado de <https://plato.stanford.edu/entries/science-theory-observation/>
- Bohm, D. (1952). A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables, I and II. *Physical Review*, *85*, 166–193.
- Bohr, N. (1988). *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza*. Madrid: Alianza Editorial.

- Bohr, Niels. (1949). Atoms and Human Knowledge. En F. Aaserud (Ed.), *Niels Bohr. Collected Works. Volume 12 Popularization and People (1911-1962)* (2007th ed., pp. 63–71). Amsterdam: Elsevier.
- Born, M. (1956). *Physics in my generation*. London: Pergamon.
- Brandon TL, S. (2013). Indeterministic Metaphors: The popular science books of Fritjof Capra y Gary Zukav. *Public Understanding of Science*, 22(5), 538–545.
- Bricmont, J. (2017) *Quantum Sense and Nonsense*. London: Springer
- Broncano, F. (2009) Individuo y sociedad en la filosofía de la ciencia. En Broncano, F., & Pérez Ransanz, A. *La ciencia y sus sujetos ¿quiénes hacen la ciencia en el siglo XXI?* (pp. 57-95). México: Siglo XXI
- Brush, S. G. (1980). The Chimerical Cat: Philosophy of Quantum Mechanics in Historical Perspective. *Social Studies of Science*, 10(4), 393–447.
- Bucci, M.; Trench, B. (2014). Science communication research. En *Handbook of Public Communication of Science and Technology* (Second Ed). Routledge.
- Bunge, M. (1956). Survey of the Interpretations of Quantum Mechanics. *American Journal of Physics*, 24, 272–286.
- Cabello, A. (2017). Interpretations of Quantum Theory: A map of Madness. En *What is Quantum Information?* (pp. 138–143). Cambridge: Cambridge University Press.
- Cadenas, Y. (2002). El origen de h y su significado físico y epistemológico en las primeras leyes cuánticas. En *Física Cuántica y Realidad* (pp. 171–194). Madrid: Editorial Complutense.
- Cadenas, Y. (2004). *Epistemología, ontología y complementariedad de Niels Bohr*. Universidad Complutense de Madrid.
- Calsamiglia, H. & van Dijk, T. (2004). Popularization discourse and knowledge about the genome. *Discourse & Society*, 15(4), 369–389.
- Calsamiglia, H. (1997). Divulgar: Itinerarios discursivos del saber. *Quark: Ciencia, Medicina, Comunicación y Cultura*, (7), 9–18.
- Calsamiglia, H. (2000). Decir la ciencia: las prácticas divulgativas en el punto de mira (Editorial). *Revista Iberoamericana de Discurso y Sociedad. Decir La Ciencia: Las Prácticas Divulgativas En El Punto de Mira*, 2(2), 3–8.
- Calvo Hernando, M. (2001). *Divulgación y periodismo científico: entre la claridad y la exactitud*. México: UNAM: DGDC.
- Capra, F. (2012). *El Tao de la Física. Una exploración de los paralelismos entre la física moderna y el misticismo oriental*. (10th ed.). Buenos Aires: Editorial Sirio.
- Cassany, D.; López, C.; Jaume, M. (2000). La transformación divulgativa de redes conceptuales científicas. Hipótesis, modelos y estrategias. *Revista Iberoamericana de Discurso y Sociedad. Decir La Ciencia: Las Prácticas Divulgativas En El Punto de Mira*, 2(2), 73–103.
- Cassidy, D. (2004). Einstein on the Photoelectric Effect. Recuperado el 4 de Mayo, 2016, desde <https://www.aip.org/history/exhibits/einstein/essay-photoelectric.htm>

- Cetto, A. M. (2015). *La luz*. México: FCE.
- Chakravartty, A. (2007). *A Metaphysics for Scientific Realism. Knowing the Unobservable*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Chakravartty, A. (2016). Scientific Realism. *Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2016 Edition). Recuperado de <https://plato.stanford.edu/archives/sum2017/entries/scientific-realism/>
- Clough, M. (2011) The Story Behind the Science: Bringing Science and Scientists to Life un Post-Secondary Science Education. *Sci & Educ*, 20, 701-717.
- Cortiñas-Rovira, S., Alonso-Marcos, F., Pont-Sorribes, C., & Escriba-Sales, E. (2015). Science journalists' perceptions and attitudes to pseudoscience in Spain. *Public Understanding of Science*, 24(4), 450–465. <https://doi.org/10.1177/0963662514558991>
- Cox, B.; Forshaw, J. (2014). *El universo cuántico. Y por qué todo lo que puede suceder, sucede*. Barcelona: Debate.
- Crease, R. P., & Mann, C. C. (1987). Physics for Mystics. *The Sciences*, 27(4), 50–57.
- Cuevas, J. G. (2005). El rol de la ética en la ciencia económica. *Ética y Economía*, 823(1), 11–28. Recuperado de <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1292657>
- Cushing, J. T. (2003). *Philosophical Concepts in Physics. The historical relation between philosophy and scientific theories*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dahlstrom, M. F. (2014). Using narratives and storytelling to communicate science with nonexpert audiences. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(Supplement_4), 13614–13620.
- Davies, S. R. & Horst, M. (2016). *Science Communication. Culture, Identity and Citizenship*. London: Springer.
- De Broglie, L. (1941). *La física nueva y los cuantos*. Buenos Aires: Losada.
- De Broglie, L. (1951). *Física y microfísica*. Madrid: Espasa-Calpe.
- De Broglie, L. (1973). *La physique nouvelle et les quanta*. Paris: Flammarion.
- de la Peña, L. (2012). *Introducción a la mecánica cuántica* (3th ed.). México: FCE.
- Dicke, R. H. & Wittke, J. P. (1960). *Introduction to Quantum Mechanics* (1966th ed.). Tokio: Addison-Wesley Publishing Company.
- Dieks, D. (1996). The Quantum Mechanical Worldpicture and Its Popularization. *Communication & Cognition*, 29(2), 153–168.
- Dirac, P. A. M. (1958). *The Principles of Quantum Mechanics* (4th ed.). Oxford: Oxford University Press.
- Dornan, C. (1990). Some problems in conceptualizing the issue of “science and the media”. *Critical Studies in Mass Communication*, 7(1), 48–71. <https://doi.org/10.1080/15295039009360163>
- Eddington, S. A. (1938). *La Naturaleza del Mundo Físico*. Buenos Aires: Ediciones SUR.
- Einstein, A., Infeld, L. (1938). *The Evolution of Physics*. Cambridge: Cambridge University Press.

- Einstein, A., Infeld, L. (1993). *La evolución de la física* (1st. 1938). Barcelona: Salvat.
- Einstein, A., Podolsky, B., Rosen, N. (2005). ¿Puede considerarse completa la descripción mecánico-cuántica de la realidad física? En Sánchez Ron, J. (Ed.) (2005) *Albert Einstein* (pp. 507–515). Barcelona: Crítica.
- Einstein, A. (1999). 4 diciembre 1926. En *Correspondencia (1916-1955) Albert Einstein, Max y Hedwig Born*. (p. 119). México: Siglo XXI.
- Eisberg, R. & Resnick, R. (2013). *Física Cuántica. Átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas*. México: Limusa Wiley.
- Estrada, L. (2002). La divulgación de la ciencia. En *Antología de la divulgación de la ciencia en México*. México: DGDC.
- Estrada, L. (2009). La ciencia hoy, y en México. Recuperado en <http://estepais.com/site/2009/la-ciencia-hoy-y-en-mexico/>
- Estrada, L. (2014). "La comunicación de la ciencia". Revista Digital Universitaria [en línea]. 1 de marzo de 2014, Vol. 15, No. 3. Recuperado de <http://www.revista.unam.mx/vol.15/num3/art18/index.html>
- Fahnestock, J. (1999). *Rhetorical Figures in Science*. New York: Oxford University Press.
- Fayard, P. (2004). *La comunicación pública de la ciencia*. México: DGDC.
- Faye, J. & Folse, H. (1994). *Niels Bohr and contemporary philosophy*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Faye, J. (2014). Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics. En *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Recuperado de <http://plato.stanford.edu/archives/fall2014/entries/qm-copenhagen/>
- Feynman, R. (2005). *El Carácter de la Ley Física* (2nd.). Barcelona: Tusquets.
- Gamow, G. (2009a). El safari cuántico. En *El nuevo breviario del Señor Tompkins* (pp. 159–171). México: FCE.
- Gamow, G. (2009b). Snooker cuántico. En *El nuevo breviario del Señor Tompkins* (pp. 131–158). México: FCE.
- Gamow, G. (2010). *Biografía de la Física*. Madrid: Alianza Editorial.
- Gamow, G. (2009). *El breviario del señor Tompkins*. Ciudad de México: FCE.
- Gibbs, R. W. (2008). *The Cambridge Handbook of Metaphor and Thought*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Goatly, A. (1997). *The Language of Metaphors*. London: Routledge.
- Gottschall, J. (2012). *The Storytelling Animal: How Stories Make Us Human*. New York: Houghton Mifflin Harcourt.
- Green, M. (2006). How and What we Can Learn from Fiction? En *Companion to the Philosophy of Literature* (pp. 350–366). London: Blackwell Publishing.
- Gregory, J. & Miller, S. (1998). *Science in Public. Communication, Culture and Credibility*. New York: Plenum Trade.
- Griffiths, D. J. (1995). *Introduction to Quantum Mechanics* (First). New Jersey: Prentice Hall.
- Gutiérrez Rodilla, B. (1998). *La ciencia empieza en la palabra. Análisis e historia del lenguaje científico*. Barcelona: Ediciones Península.

- Hacking, I. (2001). *Representar e Intervenir*. México: Paídos-UNAM.
- Hanson, N. R. (1961). *Patterns of Discovery*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hanson, N. R. (2010). Observación. En *Filosofía de la ciencia: teoría y observación* (pp. 216–252). Mexico: Siglo XXI.
- Hansson, S. O. (2013). Defining Pseudoscience and Science. En M. Pigliucci, M. & Boudry (Ed.), *Philosophy of Pseudoscience. Reconsidering the Demarcation Problem* (pp. 61–78). Chicago: The University of Chicago Press.
- Hansson, Sven Ove. (2017). Science and Pseudo-Science. En *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Recuperado de <https://plato.stanford.edu/cgi-bin/encyclopedia/archinfo.cgi?entry=pseudo-science>
- Heisenberg, W. (1927). The physical content of Quantum Kinematics and Mechanics. En W. H. Wheeler, J. A; Zurek (Ed.), *Quantum theory and measurement* (pp. 62–84). Princeton: Princeton University Press.
- Heisenberg, W. (1963). *Physics and Philosophy*. Londres: Allen & Unwin.
- Hilgartner, S. (1990). The Dominant View of Popularization: Conceptual Problems, Political Uses. *Social Studies of Science*, 20(3), 519–539.
- Hilgevoord, J., Uffink, J. (2016). The Uncertainty Principle. En *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter edition 2016). Recuperado de <https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/qt-uncertainty/>
- Hofstadter, D. (2013). *Surfaces and Essences. Analogy as the fuel and fire of thinking*. New York: Basic Books.
- Holzner, S. (2009). *Quantum Physics for Dummies*. Indiana: Wiley-Blackwell.
- Howard, D. A. (2005). Albert Einstein as a philosopher of science. *Physics Today*, 58(12), 34–40.
- Hull, D. L. (1988). *Science as Process: An Evolutionary Account of the Social and Conceptual Development of Science*. Chicago: The University of Chicago Press.
- James, E. & Mendlesonn, F. (2012) *The Cambridge Companion to Literature*. Cambridge: Cambridge University Press.
- James, J. (1930). *The Mysterious Universe* (1948th ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Jammer, M. (1966). *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. New York: John Wiley & Sons.
- Jammer, Max. (1974). *The Philosophy of Quantum Mechanics*. New York: John Wiley & Sons.
- Kaiser, D. (2011). *How the Hippies Saved Physics*. New York: W. W. Norton.
- Kakalios, J. (2010). *The Amazing Story of Quantum Mechanics. A Math-Free Exploration of the Science that Made Our World*. New York: Gotham Books.
- Kragh, H. (2007). *Generaciones cuánticas. Una historia de la física en el siglo XX*. Madrid: Akal.
- Kuhn. (2010). Las revoluciones como cambios de la concepción del mundo. In *Filosofía de la ciencia: teoría y observación* (pp. 253–278). México: Siglo XXI.
- Kuhn, T. (1987). *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica 1894 - 1912*. Madrid: Alianza Editorial.
- Lakatos, I. (1989). *La metodología de los programas de investigación científica*. Madrid: Alianza Editorial.

- Lamarque, P. (2014). Literature and Truth. En *The Opacity of Narrative* (pp. 121–139). New York: Rowman & Littlefield.
- Laplace, P. S. (1988). *Ensayo filosófico sobre las probabilidades*. México: Alianza Editorial.
- Leane, E. (2007). *Reading Popular Physics: Disciplinary Skirmishes and Textual Strategies*. New York: Ashgate Publishing, Ltd.
- Lewenstein, B V. (2003). *Models of public communication of science and technology*.
- Lewenstein, B. (1987). Was There Really a Popular Science “Boom”? *Science, Technology & Human Values*, 12(2), 29–41.
- Lewenstein, B. (2009). Science Books Since World War II. En J. Nord, D.P., Schudson, M., & Rubin (Ed.), *The Enduring Book: Publishing in Post-War America*. Chapel Hill: University of North Carolina Press.
- Longino, H. (2016). The Social Dimensions of Scientific Knowledge. *Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2016 Edition). Recuperado de <https://plato.stanford.edu/archives/spr2016/entries/scientific-knowledge-social/>
- López Beltrán, C. (1985). “La creatividad en la divulgación de la ciencia”. En F. Toussaint (Ed.), *La divulgación de la tecnología y la ciencia* (pp. 33–40). Ciudad de México: SEP, COSNET.
- López Cerezo, J. A. (2005). Participación ciudadana y cultura científica. *ARBOR Ciencia, Pensamiento y Cultura*, CLXXXI(715), 351–362.
- Lovett Cline, B. (1973). *Los creadores de la nueva física*. México: FCE.
- Mahner, M. (2007). Demarcating Science from Non-Science. En T. Kulipers (Ed.), *Handbook of the Philosophy of Science - Focal Issues* (pp. 515–575). Amsterdam: Elsevier.
- Maienschein, J. (2000). Why Study History for Science? *Biology and Philosophy*, 15, 339–348.
- Martínez, S. (2003). Cien años de Mecánica Cuántica en Filosofía. En M. de la P. Ramos Lara (Ed.), *La Mecánica Cuántica en México* (pp. 115–130). México: Siglo XXI.
- Massarani, L., & Moreira, I. (2004). Popularization of science: historical perspectives and permanent dilemmas. *Quark*, (32). Recuperado de <http://quark.prbb.org/32/032075.pdf>
- Maudlin, T. (2014). *Filosofía de la Física I. El espacio y el tiempo*. México: FCE.
- Maudlin, T. (1995). Three measurement problems. *Topoi*, 14(1), 7–15.
- Mellor, F. (2003). Demarcating Science from Non-Science in Popular Physics Book. *Social Studies of Science*, 33(4), 509–538.
- Mermin, N. D. (1990). What's wrong with this pillow? En *Boojums all the way through: communicating science in a prosaic age*. (pp. 198–206). New York: Cambridge University Press.
- Miller, S. (2001). Public understanding of science at the crossroads. *Public Understanding of Science*, 10(1), 115–120. <https://doi.org/10.1088/0963-6625/10/1/308>
- Mone, G. (2004, October). Cult Science. Dressing Up Mysticism as Quantum Physics. *Popular Science*.

- Montañés Perales, O. (2010). La cultura científica como fundamento epistemológico de la comunicación pública de la ciencia. *ArtefactoS*, 3(1), 187–229.
- Moulines, U. (2011). *El desarrollo moderno de la filosofía de la ciencia (1890-2000)*. México: UNAM Instituto de Investigaciones Filosóficas.
- Muñoz, C. (2010). El rol de la metáfora léxica en la divulgación de la ciencia. *Tabula Rasa*, (13), 273–292.
- Murdoch, D. (1987). *Niels Bohr's Philosophy of Physics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Myers, G. (2003). Discourse Studies of Scientific Popularization: Questioning the Boundaries. *Discourse Studies*, 5(2), 265–279. <https://doi.org/10.1177/1461445603005002006>
- Nader, E.-B. (2010). Classical Optics and Perspectivae Traditions Leading to the Renaissance. En C. H. Hendrix, John; Carman (Ed.), *Renaissance Theories of Vision* (pp. 11–30). Ashgate Publishing, Ltd.
- Navarro, O. (2010). El surgimiento de la complementariedad: Niels Bohr y la Conferencia de Como. *Revista Filosofía Universidad Costa Rica, XLVIII*, 65–76.
- Negrete, A., & Lartigue, C. (2004). Learning from education to communicate science as a good story. *Endeavour*, 28(3), 120–124. <https://doi.org/10.1016/j.endeavour.2004.07.003>
- Negrete, A. (2008). *La divulgación de la ciencia a través de formas narrativas*. Ciudad de México: UNAM: DGDC.
- Oatley, K. (2008). The Science of Fiction. *New Scientist*, (June), 42–43.
- Okon, E. (2014). El problema de la medición en mecánica cuántica. *Revista Mexicana de Física E*, 60, 130–140.
- Olivé, L; Pérez Ransanz, A. R. (2010). Introducción. En *Filosofía de la ciencia: teoría y observación* (pp. 11–46). México: Siglo XXI.
- Olivé, L. (2000). *El bien, el mal y la razón. Facetas de la ciencia y la tecnología*. México: Paidós.
- Olivé, L. (2007). *La ciencia y la tecnología en la sociedad del conocimiento. Ética, política y epistemología*. México: FCE.
- Olson, R. (2015). *Houston, we have a narrative. Why science need story*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Orzel, C. (2010). *Conversaciones de física con mi perro*. Barcelona: Ariel.
- Papp, D. (1968). *La doble faz del mundo físico*. Madrid: Espasa-Calpe.
- Pigliucci, M. & Boudry, M. (2013). Why the Demarcation Problem Matters. En *Philosophy of Pseudoscience. Reconsidering the Demarcation Problem* (pp. 1–6). Chicago: The University of Chicago Press.
- Planck, M. (1932). *Where is Science Going?* New York: W, W, Norton & Company.
- Propp, V. (2015) *Morfología del cuento*. México: Colofón.
- Rae, A. (1998). *Física cuántica ¿Ilusión o realidad?* Madrid: Alianza Editorial.
- Reale, G; Antiseri, D. (2010). *Historia del pensamiento filosófico y científico III. Del Romanticismo hasta hoy*. Barcelona: Herder.

- Reichenbach, H. (1996). *Objetivos y métodos del conocimiento científico*. México: FCE.
- Restivo, S. (1978). Parallels and Paradoxes in Modern Physics and Eastern Mysticism : A Critical Reconnaissance. *Social Studies of Science*, 8(2), 143–181.
- Richards, I. A. (1936). *The Philosophy of Rethoric*. Oxford: Oxford University Press.
- Rickles, D. (2008). Advancing the Philosophy of Physics. En D. Rickles (Ed.), *The Ashgate Companion to Contemporary Philosophy of Physics* (pp. 4–15). London: Ashgate.
- Rioja, A. (1992). La filosofía de la complementariedad y la descripción objetiva de la naturaleza. *Revista de Filosofía*. 3ra Época, 1(8), 257–282.
- Sagan, C. (2005). *El mundo y sus demonios*. Barcelona: Planeta
- Sánchez Mora, A. M. (2002). El bestiario de los divulgadores. En *Antología de la divulgación de la ciencia en México* (pp. 302–308). México: DGDC.
- Sánchez Mora, A. M. (2010). *Introducción a la Comunicación Escrita de la Ciencia*. Xalapa: Universidad Veracruzana.
- Sánchez Mora, A. M. (2014). Algunas consideraciones histórico-críticas sobre la narrativa en la divulgación de la ciencia. En A. Negrete Yankelevich (Ed.), *Narrar la ciencia* (pp. 85–107). Ciudad de México: UNAM: CEIICH.
- Sánchez Ron, J. M. (1995). Las filosofías de los creadores de la mecánica cuántica. *La Filosofía de Los Científicos*, 197–221.
- Sánchez Ron, J. M. (2005). *Historia de la Física Cuántica* (2da.). Madrid: Crítica.
- Saxon, D, S. (1968). *Elementary Quantum Mechanics*. San Francisco: Holden-Day.
- Schlosshauer, M., Kofler, J., & Zeilinger, A. (2013). A snapshot of foundational attitudes toward quantum mechanics. *Studies in History and Philosophy of Science Part B - Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 44(3), 222–230. Quantum Physics; History of Physics.
- Schrödinger, E. (1983). The present situation in Quantum Mechanics: A translation of Schrödinger's "cat paradox". En J. Z. Wheeler (Ed.), *Quantum theory and measurement* (pp. 152–163). New Jersey: Princeton University Press.
- Secord, J. (2004). Knowledge in transit. *Isis; an International Review Devoted to the History of Science and Its Cultural Influences*, 95(4), 654–672.
- Selleri, F. (1986). *El debate de la teoría cuántica*. Madrid: Alianza Editorial.
- Shapere, D. (2010). El concepto de observación en ciencia y en tecnología. En *Filosofía de la ciencia: teoría y observación* (pp. 479–526). México: Siglo XXI.
- Shermer, M. (2001). *The Borderlands of Science. Where Sense Meets Nonsense*. New York: Oxford University Press.
- Shinn, T., & Whitley, R. D. (1985). *Expository Science: Forms and Functions of Popularisation. Sociology of the Sciences Yearbook – Vol IX*. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-5239-3>
- Snow, C.P. (1959) *Las dos culturas*. México: UNAM.

- Sokal, A. & Bricmont, J. (2008). *Imposturas Intelectuales*. Barcelona: Paidós.
- Sokal, A. (1996). Transgressing the Boundaries: Toward a Transformative Hermeneutics of Quantum Gravity. *Social Text*, 217–252.
- Stannard, R. (1998). *Uncle Albert and the Quantum Quest*. London: Faber and Faber.
- Sus, A. (2017). Mecánica cuántica: interpretación y divulgación. *Investigación y Ciencia*, Julio, 68–73.
- The Gifford Lectures. (2017). Recuperado 1 agosto, 2017, <https://www.giffordlectures.org/>
- Turney, J. (1999). The Word and the World: Engaging with Science in Print. En E. Scanlon (Ed.), *Communicating Science: Contexts and Channels*. (pp. 120–133). London: Routledge.
- Turney, J. (2007). The latest boom in popular science books. En M. Bauer, Martin W. & Bucchi (Ed.), *Journalism, Science and Society. Science Communication between News and Public Relations*. (pp. 81–92). New York: Routledge.
- Weinert, F. (2009). *The Scientist as Philosopher. Philosophical consequences of great scientific discoveries*. Heidelberg: Springer.
- Wheeler, A., & Mehra, J. (1973). *The Physicists's Conception of Nature*. Amsterdam: Dordrecht.
- Whitaker, A. (1996). *Einstein, Bohr and the Quantum Dilemma*. Cambridge: Cambridge University Press.
- White, H. (1994). *El contenido de la forma. Narrativa, discurso y la representación histórica*. Barcelona: Paidós.
- Whitworth, M. (1994). *Physics and the literary community, 1905 - 1939*. Oxford: University of Oxford.
- Wigner, E. P. (1995). Remarks on the Mind-Body Question. En *Philosophical Reflections and Syntheses. The Collected Works of Eugene Paul Wigner*. (pp. 247–260). Berlin: Springer.
- Willems, J., & de Bruin, J. (1996). Ethics of Science Popularization: An inquiry among Scientists, Information Officers and Science Journalists in the Netherlands. *Bulletin of Science, Technology & Society*, 16(1–2), 41–46.
- Wolfe, M., & Mienko, J. (2007). Learning and memory of factual content from narrative and expository text. *British Journal of Educational Psychology*, 77(3), 541–564.
- Wynn, C. M. (2001). *Quantum leaps in the wrong direction: where real science ends and pseudoscience begins*. Washington, D.C.: Joseph Henry Press.
- Zamora Bonilla, J. (2005). *Ciencia pública - Ciencia privada. Reflexiones sobre la producción del saber científico*. México: FCE.
- Zukav, G. (1999). *La danza de los maestros de Wu Li*. Madrid: Gaia.



